

# ТРАЕКТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ — ЧЕЛОВЕК, ПРИРОДА, ТЕХНОЛОГИИ



НАУЧНЫЙ ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

№ 1 (9) 2024





# ТРАЕКТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ – ЧЕЛОВЕК, ПРИРОДА, ТЕХНОЛОГИИ

№ 1 (9) 2024

## Главный редактор

Ярмошенко Илья Владимирович, к. ф.-м. н., директор Института промышленной экологии УрО РАН (г. Екатеринбург)

## Заместитель главного редактора

Васильев Алексей Владимирович, к. т. н., заведующий лабораторией Института промышленной экологии УрО РАН (г. Екатеринбург)

## Редакционная коллегия

Вараксин Анатолий Николаевич, д. ф.-м. н., профессор, главный научный сотрудник Института промышленной экологии УрО РАН (г. Екатеринбург)

Веселкин Денис Васильевич, д. б. н., заведующий лабораторией Института экологии растений и животных УрО РАН (г. Екатеринбург)

Екидин Алексей Акимович, к. ф.-м. н., доцент, ведущий научный сотрудник Института промышленной экологии УрО РАН (г. Екатеринбург)

Захаров Вячеслав Иосифович, д. ф.-м. н., профессор, заведующий лабораторией Уральского федерального университета им. первого Президента России Б. Н. Ельцина (г. Екатеринбург)

Иванов Владимир Юрьевич, к. ф.-м. н., директор института Уральского федерального университета им. первого Президента России Б. Н. Ельцина (г. Екатеринбург)

Крышев Александр Иванович, д. б. н., заведующий лабораторией Научно-производственного объединения «Тайфун» Росгидромета (г. Обнинск)

Марков Дмитрий Владимирович, д. т. н., директор АО «НИИТФА» (г. Москва)

Микляев Петр Сергеевич, д. г.-м. н., профессор РАН, главный научный сотрудник Института геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН (г. Москва)

Сюрдо Александр Иванович, д. ф.-м. н., профессор, главный научный сотрудник Института физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН (г. Екатеринбург)

Талалай Александр Григорьевич, д. г.-м. н., профессор, заведующий кафедрой Уральского государственного горного университета (г. Екатеринбург)

Тузанкина Ирина Александровна, заслуженный деятель науки РФ, д. м. н., профессор, Институт иммунологии и физиологии УрО РАН (г. Екатеринбург)

Юрков Анатолий Константинович, к. г.-м. н., заведующий лабораторией Института геофизики им. Ю. П. Булашевича УрО РАН (г. Екатеринбург)



## СОДЕРЖАНИЕ

Иммерсивная виртуальная реальность в изучении иностранных языков взрослыми людьми: обзор 2014–2020 гг. <b>А. С. Буторова, А. И. Косаченко, Д. А. Тарасов, А. П. Сергеев</b> .....	2
Обобщенный показатель загрязнения почвы и растительности медью и цинком в районе медноколчеданного месторождения <b>А. Н. Медведев, М. А. Медведев</b> .....	17
Влияние угловой и энергетической зависимостей чувствительности индивидуальных дозиметров на оценку облучения персонала <b>И. С. Спиридонова, М. Д. Пышкина, А. В. Васильев, А. А. Екидин</b> .....	26
Изменение экологической обстановки регионов Донбасса вследствие военных действий <b>Г. Я. Дрозд, Е. И. Верех-Белоусова</b> .....	36
Краткий анализ состояния дел с уборкой снега в крупном российском городе на примере г. Екатеринбурга <b>А. В. Шевченко, Г. П. Малиновский, А. А. Селезнев, И. В. Яρμοшенко</b> .....	51
Реализация ROC-анализа для определения пороговых значений новых антропометрических индексов BRI, ABSI, LAP <b>Н. В. Билаш, Е. Д. Константинова, С. Ю. Огородникова, Т. А. Маслакова</b> .....	64

**ТРАЕКТОРИЯ  
ИССЛЕДОВАНИЙ –  
ЧЕЛОВЕК, ПРИРОДА,  
ТЕХНОЛОГИИ**  
**№ 1 (9) 2024**

**Главный редактор:**  
И. В. Яρμοшенко

**Редактор:**  
М. Э. Чупрякова

**Компьютерная верстка:**  
Д. Д. Десятов

**Дизайн обложки:**  
А. В. Вожаков

**Адрес редакции:**  
620990, г. Екатеринбург,  
ИПЭ УрО РАН,  
ул. С. Ковалевской, 20

Тел.: (343) 374-37-71  
E-mail: iie@ecko.uran.ru  
www.restrajectory.ru

Журнал зарегистрирован  
Федеральной службой  
по надзору в сфере связи,  
информационных  
технологий и массовых  
коммуникаций  
27 апреля 2022 г.,  
Эл№ ФС77-83207

**Учредитель**  
**ИПЭ УрО РАН**

Перепечатка материалов,  
опубликованных в журнале,  
возможна только с  
разрешения редакции.

## ИММЕРСИВНАЯ ВИРТУАЛЬНАЯ РЕАЛЬНОСТЬ В ИЗУЧЕНИИ ИНОСТРАННЫХ ЯЗЫКОВ ВЗРОСЛЫМИ ЛЮДЬМИ: ОБЗОР 2014–2020 ГГ.

А. С. Буторова<sup>1</sup>, А. И. Косаченко<sup>2</sup>, Д. А. Тарасов<sup>2</sup>, А. П. Сергеев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия*

<sup>2</sup> *Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия*

Процесс глобализации неразрывно связан с межкультурными коммуникациями и, как следствие, с необходимостью повышения эффективности изучения иностранных языков. Погружение в среду носителей языка, реализованное в виртуальной реальности (VR), могло бы помочь решить эту проблему. Применение технологий виртуальной реальности в образовательном процессе поднимает вопрос выявления факторов, влияющих на эффективность такого обучения. В работе для анализа были отобраны научные публикации в области изучения иностранных языков в виртуальной реальности из международных научных баз данных: Scopus, Web of Science, PubMed по сформулированному авторами запросу. Полученная выборка содержала 733 научных источника. Окончательный отбор источников осуществлялся по трем критериям: 1) использование систем иммерсивной виртуальной реальности (ИВР): HTC Vive, HTC Vive PRO, Oculus Rift, 2) наличие формирующего эксперимента, направленного на приобретение языковых знаний, 3) участие в эксперименте совершеннолетних людей без ограничений возможностей здоровья (ОВЗ), изучающих второй язык. В результате было отобрано 13 экспериментальных работ. Эти работы были классифицированы по направленности тренажера и по формализованности задания. По направленности тренажера статьи классифицированы на содержащие эксперименты с грамматическими упражнениями, на тренировку памяти, аудирование, на социальное взаимодействие и улучшение разговорных навыков. По формализованности задания статьи классифицированы на эксперименты со строго регламентированными заданиями и эксперименты со свободным изучением среды. Доля работ, посвященных изучению иностранного языка с использованием технологий иммерсивной виртуальной реальности, составила 1,8 % (13 работ из исходных 733). Из 13 экспериментальных работ 8 показали положительный эффект от использования иммерсивной виртуальной реальности в изучении иностранного языка, остальные 5 работ не содержали оценок эффекта.

**Ключевые слова:** иммерсивная виртуальная реальность; иностранный язык; изучение; тренажер.

### 1. Введение

В ускоряющейся динамике современного мира многие люди отказываются от традиционных методов изучения иностранного языка в классе в пользу онлайн-обучения в приложениях или мессенджерах [1–3]. Такой переход позволяет сэкономить время на дорогу, поиск и выбор репетитора, а также позволяет общаться с носителями языка, не дожидаясь личного внимания со стороны преподавателя. Цифровые образовательные платформы обеспечивают доступ к образовательному контенту различных тематик и форматов. Платформы собирают метаданные об учащихся, что позволяет непрерывно анализировать процесс обучения и отмечать как снижение, так и повышение интереса. Такой подход позволяет корректировать образовательную траекторию в процессе обучения.

Учитывая эти преимущества, ожидается, что адаптация студента к процессу изучения иностранного языка сделает его более продуктивным и приятным [4, 5].

Современные цифровые технологии, такие как VR, могут быть включены в качестве инструмента в процесс изучения второго языка.

Часто под виртуальной реальностью понимают смоделированный опыт, который может быть похож на реальный мир или совершенно отличаться от него. Однако было установлено, что VR может восприниматься через специализированное оборудование, которое позволяет пользователю взаимодействовать в реалистичных трехмерных средах [6].

Иммерсивная виртуальная реальность – это частный случай виртуальной реальности. Он направлен на то, чтобы переместить людей в виртуальное место, где они переживают события и принимают участие в них. Такие приложения в основном создают иллюзии пребывания в месте, изображенном в ИВР [7]. Эти иллюзии вызывают эффект присутствия и позволяют людям взаимодействовать и чувствовать связь с миром за пределами их физического тела посредством технологий. Эффект присутствия определяется как впечатление включенности человека в события, характеризующие сцену [8, 9]. Лабораторная комната заменяется альтернативным миром, созданным в цифровой форме и сгенерированным компьютером. Движения участников отслеживаются в режиме реального времени, поэтому изображения визуально обновляются в зависимости от положения и ориентации головы [10].

Поскольку ИВР создает мультисенсорный поток (звук, анимация, изображения), она может сделать обучение более эффективным, интересным и быстрым. Несмотря на это, долгосрочное влияние применения технологии ИВР на изучение языка до сих пор недостаточно изучено.

**Цель настоящей работы** – выявить и классифицировать основные направления исследований в области изучения иностранного языка в ИВР совершеннолетними людьми.

## 2. Материалы и методы

Источники для обзора отбирались последовательно по заданным правилам для определения степени изученности проблемы и формулирования гипотез о предмете исследования. Такой метод отбора был выбран, т. к. большое разнообразие источников увеличивает вероятность упустить из виду работу по теме исследования [11].

Статьи для обзора были получены из ведущих международных баз данных: Scopus, Web of Science, PubMed, по запросу «((VIRTUAL REALITY) OR (IMMERSIVE REALITY)) AND (LANGUAGE AND LEARNING)) AND PUBYEAR>2014» [30 июня 2020].

Результат запроса (всего 733 научных источника) был помещен в таблицу системы управления библиографией Zotero.

Окончательный отбор источников осуществлялся по трем критериям:

- применение в исследовании систем ИВР: HTC Vive, HTC Vive Pro, Oculus Rift;
- наличие формирующего эксперимента, направленного на приобретение знаний по языку;
- совершеннолетние участники без ограничений возможностей здоровья (ОВЗ), изучающие второй язык.

Поскольку количество отобранных источников было достаточно большим (733 источника), не все из них были прочитаны полностью. Сначала просматривалась аннотация и ключевые слова, затем обращалось внимание на оборудование, которое использовалось в работе. Если на этом этапе было недостаточно ясно, соответствует ли работа критериям отбора и она не содержала поясняющих скриншотов или рисунков, ее прочитывали полностью.

## 3. Результаты

В результате окончательного отбора было получено 13 экспериментальных работ (табл. 1).

Таблица 1. Отобранные статьи

Источник	Название статьи
[12]	The Effects of Virtual Reality Learning Environment on Student Cognitive and Linguistic Development
[13]	Affordance Compatibility Effect for Word Learning in Virtual Reality
[14]	A Virtual Reality Experience for Learning Languages
[15]	Is Motor Simulation Involved During Foreign Language Learning? A Virtual Reality Experiment
[16]	Ogma – A virtual reality language acquisition system
[17]	The Research on Chinese Idioms Educational Games in TCFL Based on Virtual Reality
[18]	Virtual reality in education: Learning a foreign language
[19]	Language Learning in a Cognitive and Immersive Environment Using Contextualized Panoramic Imagery
[20]	SeLL: Second language learning paired with VR and AI
[21]	Virtual Reality in Teaching of Foreign Languages
[22]	Words In Kitchen: An Instance of Leveraging Virtual Reality Technology
[23]	A TEFL Virtual Reality System for High-Presence Distance Learning
[24]	University EAP students' perceptions of using a prototype virtual reality learning environment to learn writing structure

Отобранные статьи были классифицированы по направленности тренажера и по формализованности задания. По направленности тренажера выделены статьи, содержащие эксперименты с грамматическими упражнениями, на тренировку памяти, аудирование, на социальное взаимодействие и улучшение разговорных навыков. По формализованности задания выделены статьи, описывающие эксперименты со строго регламентированными заданиями и свободным изучением среды.

### 3.1. Классификация по направленности тренажера

#### 3.1.1. Улучшение разговорных навыков

В работе [12] была разработана иммерсивная виртуальная среда (ИВС) – универмаг с шестью этажами. Иммерсивная виртуальная среда предназначалась для улучшения языковых навыков студентов в основном путем пополнения словарного запаса, поскольку словарный запас является одним из основных маркеров языковых способностей и обеспечивает понимание при чтении и аудировании. Тестировались четыре аспекта изучения лексики с использованием различных когнитивных уровней таксономии Блума: фонологии, морфологии, семантики и синтаксиса. Участники выполняли задания в различных сценах, например, в книжном магазине и на стойке регистрации.

Результаты [12] показали улучшение языковых и когнитивных способностей участников. Уникальные особенности иммерсивной виртуальной среды, простота ее использования, эффект погружения способствовали развитию более высоких когнитивных уровней мышления.

Разработанная иммерсивная виртуальная среда позволила осуществлять контекстное обучение и облегчила процесс освоения английского языка, поскольку многие улучшения были выявлены путем изучения реакции студентов на каждый из языковых элементов.

### 3.1.2. Тренировка памяти

В статье [14] описан интерактивный опыт применения ИВР для изучения испанского языка посредством поиска в игровом формате. Игроки искали предметы в виртуальной комнате с помощью звуковых и читаемых подсказок.

Во время поиска пользователи наводили на объекты взгляд; объекты, которые можно было выбрать, выделялись синим цветом. Если игрок выбирал неверный объект, объект подсвечивался красным. После нахождения верного объекта его название воспроизводилось пользователю, а счет пользователя увеличивался на 10 баллов. Затем пользователю предлагалось найти следующий объект. Игра продолжалась до тех пор, пока все объекты не были найдены.

Результаты фокус-группы в статье [14] показали, что участникам понравилось изучать иностранный язык с помощью ИВР. Респонденты отметили, что изучение языка в иммерсивном виртуальном пространстве было более приятным, чем традиционные методы обучения, с которыми они сталкивались. По словам участников, обучение в иммерсивной виртуальной среде помогло им лучше запомнить названия объектов, с которыми они взаимодействовали.

В исследовании [16] участники запоминали шведские слова, обозначающие различные предметы, в иммерсивной виртуальной комнате. Затем участники прослушивали названия предметов на шведском языке и указывали на них. Авторы [16] выявили, что погружение обучающихся в среду языка мотивировало их. Пользователи отметили, что фоновая классическая музыка усиливала эффект погружения и улучшала концентрацию внимания. Результаты [16] показали, что процент удержания слов в памяти при использовании ИВР был значимо выше, чем при использовании традиционного метода обучения. Участники отметили, что визуализация помогла им лучше запомнить слова, поскольку они могли мысленно вернуться в комнату и представить предмет и его название.

Влияние сенсомоторного взаимодействия на запоминание иностранных слов изучалось в работе [13]. Языковые представления, основанные на сенсомоторном опыте – слова, связанные с конкретными зрительными образами, звуками и движениями, – вызывают эти слова в памяти. Слово связывается в памяти с предметом или действием, к которому оно относится, или с жестом, означающим это действие. Реалистичные объекты и движения с большей вероятностью приведут к запоминанию. В эксперименте участникам предлагалось выучить названия шести новых объектов по команде, манипулируя ими левой или правой рукой. Результаты [13] показали, что участники быстрее реагировали на стимулы, когда ведущая рука совпадала с рукой, используемой для взаимодействия с названным объектом.

Связь между изучением языка и двигательной активностью изучалась в [15]. Поскольку при обработке языка активируются области моторной и премоторной коры, возникает необходимость изучения влияния жестов на вербальную память. Цель работы [15] заключалась в исследовании роли двигательного моделирования в процессе овладения иностранным языком. Авторы предположили, что если имитация действия, описываемого глаголом, важна для изучения значения глагола, то сопутствующее действие, называемое соответствующим глаголом, должно способствовать его запоминанию. Результат [15] показал, что одной симуляции недостаточно, чтобы установить связь между глаголами и действиями. Кроме того, изучалось, как присутствие (в т. ч. пространственное) модулирует языковые процессы.

Исследование [17] было направлено на изучение китайских идиом. Процесс обучения представлял собой погружение в китайскую культуру посредством бесед с героем китайского фольклора Юй Гуном. В ИВР была воссоздана китайская традиционная сценка. Пользователи помогали Юй Гуну сдвинуть гору. Изучение идиом позволило не только расширить словарный запас, но и научиться более образно выражать мысли. Авторы [17] пришли к выводу, что ИВР улучшила

понимание языка и вызвала интерес у обучающихся.

В работе [22] авторы разработали систему ИВР под названием Words In Kitchen. Пользователи изучали новую лексику во время взаимодействия с предметами (фруктами, овощами, посудой), подписанными на английском языке, запоминали их написание и произношение. Виртуальный персонаж обучал участников написанию и произношению и обеспечивал мгновенную обратную связь на протяжении всего процесса обучения. В результате все участники в среднем улучшили свои знания и были готовы продолжать обучение в иммерсивной виртуальной среде. Они отметили простоту использования системы и виртуального персонажа.

### **3.1.3. Аудирование**

В исследовании [18] сравнивались два формата изучения иностранного языка посредством аудирования: традиционный и в ИВР. Оценивались эффект присутствия, удовлетворенность и приобретение пользователями знаний. Виртуальная симуляция содержала диалоги на английском языке, аналогичные тем, которые обычно используются в упражнениях на аудирование. Для двух режимов обучения использовалась одна и та же слуховая стимуляция. Показатель сохранения знаний был одинаковым при прослушивании диалогов в иммерсивном виртуальном пространстве и при традиционном прослушивании. Участники были более удовлетворены обучением в ИВР.

### **3.1.4. Социальное взаимодействие**

В рамках проекта Mandarin Project [19] обучающиеся узнавали о культурных нормах Китая, приобретали словарный запас и выполняли задания по ряду тем. Для исследования была построена иммерсивная комната. Обучающиеся выполняли задания посредством взаимодействия с интеллектуальными агентами и мультимодальными жестами. Для получения знаний о культуре изучаемой страны была использована технология Google Street View, обеспечивающая богатый культурный контекст. Обучающиеся исследовали окружающую среду и сталкивались с людьми и объектами, взаимодействуя с которыми, отрабатывали жизненно необходимые фразы, построенные в форме коротких и естественных диалогов. Например, полицейский помогал игроку найти нужное место, а официант принимал заказ в ресторане.

В работе [21] авторы создали в ИВР таможенный пункт, расположенный в международном аэропорту. Обучение было направлено на ситуативное взаимодействие, при котором обучающийся мог контактировать с персонажами и получать от них информацию. Авторы [21] выдвинули гипотезу: изучение иностранного языка традиционными методами неэффективно в случаях работы над речью (особенно спонтанной речью), словарным запасом. Обучающийся перемещался по таможенной зоне, вступая в диалоги с персоналом и изучая надписи на таможенном оборудовании и стендах. В одном из таких залов обучающийся мог ознакомиться с наименованиями таможенного оборудования, изучить таможенную декларацию, список запрещенных предметов и поучаствовать в диалогах со служащим таможни.

Исследование [20] объединило технологии ИВР и искусственного интеллекта в задаче обучения иностранному языку. Обучающиеся оказывались в различных локациях и выполняли задания, например, объясняли математическое уравнение или выступали перед аудиторией. Интеллектуальный агент записывал реплики между паузами, а затем объединял их в предложения. Система оценивала произношение обучающихся и выдавала общую оценку по окончании обучения, включая накопленный балл и индивидуальные оценки за произношение, беглость и экспрессию речи.



Иммерсивная виртуальная среда, разработанная в [23], представляла собой комнату для собеседований в офисе во время ярмарки вакансий, где пользователи могли подготовиться к реальным собеседованиям. Преподаватель объяснял поведение на деловом собеседовании и давал полезные фразы и рекомендации по ответам на вопросы собеседования. В комнате размещались различные предметы (книги, руководства, продукция компании), которые должны были помочь пользователю выполнить задание и ответить на всплывающие вопросы. Количество правильных ответов обучающихся увеличилось с 40 до 70 %. Трое из восьми участников отметили, что им было сложно сосредоточиться на обучении из-за необходимости манипулировать интерфейсом в шлеме.

### **3.1.5. Грамматические упражнения**

В этой категории представлена единственная работа [24], цель которой – изучить стиль и структуру письма, встречающиеся в академическом английском языке. По замыслу авторов, каждая функция предложения (тематическое предложение, поддерживающая идея, уточняющая деталь или пример, заключение) имела определенный цвет. Учащиеся без ограничений по времени читали текст и раскрашивали предложения в соответствии с их функциями. Половина участников отметила положительный эффект при изучении структуры письма в ИВР и ответила, что порекомендовала бы эту технологию другим обучающимся. Также некоторые участники почувствовали дискомфорт, связанный с длительным использованием гарнитуры.

## **3.2. По степени формализованности задачи**

### **3.2.1. Свободное исследование среды**

В работах, включенных в эту категорию, пользователю предоставлялась свобода перемещения по виртуальному миру: по улице, квартире или комнате. При этом он должен был выполнять задания: найти предмет или персонажа, который сможет помочь ему советом.

В исследовании [18] пользователи ходили по иммерсивной виртуальной среде и взаимодействовали с ней без какой-либо конкретной цели, чтобы освоиться с навигацией по триггеру контроллера. После этого участникам предлагались как звуковые, так и текстовые подсказки на испанском языке, которые указывали следующий объект для поиска. Если объект был выбран неправильно, он выделялся красным цветом. Если ответ был правильным, пользователь получал баллы и новый объект для поиска. Участники могли видеть свои оценки и отслеживать свои успехи.

В ИВС обучения [16] респонденты могли попрактиковаться в перемещении и навигации, прежде чем войти в комнату. Им было дано достаточно времени, чтобы ознакомиться с ИВС, почувствовать себя в ней комфортно и начать легко в ней ориентироваться. Изученные объекты отмечались знаком «!». Когда пользователь приближался к объекту, он видел его название на шведском языке и слышал, как оно произносится. Исследование одного объекта занимало 5 минут. На следующем шаге текст над объектами больше не отображался. Пользователь слышал шведские слова и должен был указать соответствующие объекты, приближаясь к ним. Как только задача была выполнена, появлялось сообщение о том, что гарнитуру можно снять.

В иммерсивной комнате, построенной в работе [19], респонденты проходили квесты, состоящие из отдельных сцен, соединенных точками навигации. Например, обучающие проходили несколько мест на популярной пешеходной улице Шанхая, чтобы добраться до набережной. Пользователи изучали традиционные формы искусства и гуляли по китайскому саду. Каждая интерактивная сцена давала возможность попрактиковать словарный запас, связанный с найденными в ней объектами.

### 3.2.2. Строго регламентированные задания

Тренажеры со строго регламентированными заданиями отличаются тем, что игроки помещаются в определенную ситуацию с установленными правилами.

Концепция дизайна иммерсивной виртуальной среды [12] была полностью основана на игре и сценарии. Иммерсивный виртуальный мир выполнен в виде универмага с шестью модулями – этажами универмага. В каждом блоке размещалось свое задание, которое обучающиеся должны были выполнить, чтобы перейти на следующий уровень обучения.

Эксперимент по влиянию сенсомоторного опыта на изучение слов в ИВР [13] состоял из трех этапов. В первом эксперименте участники выучили названия шести новых предметов – бутылочек с зельями, визуально различающихся формой и цветом. Зелья располагались по обе стороны от большого котла в центре. Предметы с правой стороны имели ручки справа, чтобы их можно было взять только правой рукой, у предметов с левой стороны ручки располагались слева. Участникам было предложено насыпать в котел определенные ингредиенты. Если ингредиент был неверным, котел взрывался – и зелья хаотично распределялись по сторонам котла, причем сторона, на которой изначально находился предмет, не менялась.

Если участник правильно насыпал все ингредиенты по рецепту, играла музыка. Процесс обучения повторялся до тех пор, пока участники не выполнили 20 рецептов. Затем участники слышали одно из слов, и им показывали цвет, соответствующий одному из предметов. Участники быстро нажимали на один триггер контроллера, если цвет соответствовал названному ингредиенту, или на другой, если цвет не совпадал. Во втором эксперименте участники выполняли обучающее задание устно, наблюдая, как виртуальные руки манипулируют предметами. Второй этап был практически идентичен первому. По его условиям участники контролировали объекты, устно называя их порядковый номер.

В исследовании [15] участникам было предложено выучить 15 чешских глаголов, обозначающих действия, выполняемые руками и ногами, и абстрактные слова с сопутствующими реальными и виртуальными двигательными задачами. Игроки слышали чешский глагол, спустя одну секунду его итальянский перевод, затем еще через одну секунду глагол повторялся на чешском языке. Следующий глагол для изучения звучал после паузы в три секунды. Таких циклов было пять, поэтому слова прозвучали 75 раз. Иммерсивная виртуальная среда представляла собой пустынный парк в солнечный день. Участники были разделены на две группы – беговая/базовая. На этапе исследования первая группа должна была пройти по парку, не останавливаясь, слушая слова (движение осуществлялось с помощью джойстика). При этом им было запрещено совершать какие-либо действия в реальном мире, кроме управления джойстиком левой рукой. Вторая группа сидела на скамейке в парке и наблюдала реальный мир. На следующем этапе экспериментатор диктовал слова на чешском языке, участники называли их перевод. Затем студенты слушали чешские слова и выбирали на экране один из двух вариантов перевода.

Задачи, поставленные перед студентами в иммерсивном виртуальном мире исследования [20], направлены на вербальное общение с другим учеником или с виртуальным персонажем, управляемым ИИ. Благодаря интеграции ИВР и искусственного интеллекта система изучения английского языка имитирует физическое присутствие изучающих язык в воображаемой среде.

Каждое задание было рассчитано на 5–20 минут и имело несколько уровней, соответствующих разной языковой сложности. Пользователь мог перейти на более высокий уровень только после выполнения определенных задач низкого уровня. Когда обучающийся выполнял заданное количество заданий и достигал определенного уровня беглости речи, он переходил на более высокий уровень и в другую среду.

В эксперименте [17] на каждую задачу было отведено определенное количество времени. Всего испытуемый выполнял 5 таких заданий. Следуя

указаниям, игрок должен был подойти к персонажу, который вел себя необычно, и выяснить причину его поведения. Персонаж объяснял участнику, что хочет передвинуть горы, поскольку они слишком высоки, а путь через них слишком длинный. В следующем задании игроку необходимо было поддержать боевой дух персонажа, а в 4 и 5 – помочь ему и его семье передвинуть горы.

В исследовании [18] были реализованы два сценария: формальный диалог в офисе и неформальный разговор в пабе. В обоих сценариях пользователь находился за столом и был окружен неигровыми персонажами, участвующими в диалогах. Сам игрок в разговорах не участвовал. Прослушав диалоги, респондент отвечал на вопросы по поводу услышанного материала.

Среда, разработанная в [21], имела два режима: обучающий и интерактивный с возможностью тестирования ученика. В первом режиме игрок выступал в роли пассажира. Он осматривал таможенный пост, а затем проходил паспортный и таможенный контроль, используя стандартные диалоги на английском языке. На экране устройства ИВР отображались субтитры этих диалогов. Сотрудник таможенного поста встречал пассажира у входа. Он приветствовал пассажира и рассказывал ему об обязанностях сотрудника таможни и таможенной службы. В интерактивном режиме пользователь проходил виртуальную проверку в роли таможенника. Некоторые фразы в диалогах были пропущены, а испытуемому предлагалось выбрать необходимый токен в соответствии с правилами английского языка и смысловой нагрузки. Система подсчитывала правильные ответы ученика и оценивала их.

Виртуальный персонаж в работе [22] выступал в роли компаньона и давал ученикам задания. Подробная информация об объекте в сцене, с которым взаимодействовал пользователь, всегда отображалась в диалоговом окне над виртуальным персонажем как на английском, так и на китайском языке. Сначала участники свободно изучали окружающую среду без ограничений по времени. Затем им было предложено найти все фрукты, овощи и посуду по описанию персонажа. И наконец пользователи слышали названия 25 изучаемых объектов и указывали на них.

В исследовании [23] образовательные технологии сочетались с проектированием, чтобы создать сетевую систему для «живого» учителя, который инструктирует и оценивает навыки английского языка с использованием ИВР. Использование виртуального офиса и движущихся объектов позволяло проводить обучение на основе задач. Таким образом, преподаватель, выступая в роли интервьюера, мог попросить совета у новых сотрудников. Это задание позволяло проверить несколько уровней понимания. Во-первых, участник мог найти руководство, используя контекстные подсказки (название и обложка с соответствующей фотографией). Во-вторых, пользователь мог перемещаться в физическом пространстве комнаты, фиксируя результат обучения.

Пользователи среды обучения [24] успевали читать и раскрашивать предложения в тексте согласно их функциям. Учащиеся выбирали цвет, указывая на нужные ведра с краской в иммерсивной виртуальной среде, и рисовали предложения на цифровом холсте, содержащем абзац или целое эссе. Участникам было разрешено зачеркнуть ненужное предложение или изменить цвет в случае ошибки. Также в системе было предусмотрено меню помощи, в котором давалась информация о структуре параграфа или эссе, а также инструкции по выполнению задания. Всего в книге было 30 абзацев и 9 эссе с 3 уровнями сложности: легкий, средний и сложный.

#### 4. Обсуждение

Из 733 исходных работ было отобрано 13 экспериментальных статей, посвященных изучению иностранного языка с использованием технологий иммерсивной виртуальной реальности, что составляет 1,8 %. По мнению авторов, столь малое количество отобранных работ может быть объяснено недостаточным

аппаратным и методическим обеспечением подобных исследований.

#### 4.1. Обобщение результатов

Выводы каждой из 13 статей были проанализированы для обобщения результатов исследования (табл. 2). Значение поля «эффект» заполнялось по следующему правилу: «положительный» – если в работе получен хотя бы один положительный результат при отсутствии отрицательных; «не оценен» – если в работе эффект не оценивался.

Авторы 8 работ оценили роль ИВР в изучении иностранных языков как положительную. Остальные 5 работ не содержали оценок использования этой технологии при изучении иностранного языка. В целом можно заключить, что большинство отобранных работ подтверждают эффективность использования ИВР для изучения иностранных языков.

Таблица 2. Классификация отобранных статей

Источ- ник	По направленности тренажера					По формализованности задания		Эффект
	Разговор- ные навыки	Па- мять	Аудирова- ние	Социальное взаимодей- ствие	Грамматиче- ские упраж- нения	Строго регламенти- рованные задания	Свободное изучение среды	
[12]	✓					✓		Положительный
[13]		✓				✓		Положительный
[14]		✓					✓	Не оценен
[15]		✓				✓		Положительный
[16]		✓					✓	Положительный
[17]		✓				✓		Не оценен
[18]			✓			✓		Положительный
[19]				✓			✓	Не оценен
[20]				✓		✓		Не оценен
[21]				✓		✓		Не оценен
[22]		✓				✓		Положительный
[23]				✓		✓		Положительный
[24]					✓	✓		Положительный

В работах [14, 16, 17, 22] авторы отметили повышенную эмоциональную вовлеченность испытуемых (fun, enjoyability, almost like playing a game, feeling not like studying, great interest, entertaining) в обучении в условиях ИВР без количественной оценки этой вовлеченности и ее связи с эффективностью обучения.

В нескольких работах [14, 16] участники отмечали, что обучение в ИВР помогало им лучше запоминать названия объектов, с которыми они взаимодействовали.

#### 4.2. Ограничения и перспективы

Поскольку количество отобранных источников было достаточно большим (733 единицы), каждая статья не читалась целиком (метод отбора описан в разделе 2). Кроме того, настоящее исследование сосредоточено на изучении иностранного языка взрослыми совершеннолетними участниками. Это означает, что, возможно, были пропущены некоторые методы, описанные в статьях, посвященных детям, и эти методы аналогичным образом можно было бы использовать при изучении языка взрослыми.

Использование искусственной мультисенсорной среды и особенно ИВР в образовательном процессе имеет большие перспективы как для научных, так и для практических целей. С одной стороны, научные исследования в этой области могли

бы уточнить особенности восприятия, памяти, внимания и т. д. в новой искусственной среде, с другой стороны, знание этих особенностей могло бы позволить организовать более эффективный образовательный процесс.

Поскольку технологии иммерсивной виртуальной реальности продолжают совершенствоваться, они обладают потенциалом для обучения иностранным языкам [25–27]. Появление новых функций в системах ИВР открывает возможности для преподавания иностранного языка. Например, в работе [28] сообщается о разработке учебной платформы виртуальной реальности, в которой учащиеся могут внести свой вклад в виде загрузки собственных панорамных видеороликов, которые становятся частью учебной платформы.

## 5. Выводы

1. Доля работ, посвященных изучению иностранного языка с использованием технологий иммерсивной виртуальной реальности совершеннолетними людьми без ОВЗ, составила 1,8 % (13 экспериментальных работ из исходных 733). Из 13 отобранных экспериментальных работ 8 показали положительный эффект от использования иммерсивной виртуальной реальности. Остальные 5 работ не содержали оценок эффекта.

2. Основные направления исследований в области изучения иностранных языков в иммерсивной виртуальной реальности совершеннолетними людьми классифицированы на работы по направленности тренажера (эксперименты с грамматическими упражнениями, на тренировку памяти, аудирование, на социальное взаимодействие и улучшение разговорных навыков) и работы по формализованности задания (эксперименты со строго регламентированными заданиями и свободным изучением среды).

3. В целом развитие технологий изучения иностранных языков с использованием иммерсивной виртуальной реальности представляется авторам перспективным.

## 6. Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Программы развития Уральского федерального университета им. первого Президента России Б. Н. Ельцина в соответствии с программой стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

## 7. Список литературы

1. *Fan, S.* Technology-enhanced collaborative language learning: theoretical foundations, technologies, and implications / S. Fan, Zou Di // *Computer Assisted Language Learning*. – 2022. – Vol. 35, № 8. – P. 1754–1788. – DOI: 10.1080/09588221.2020.1831545.
2. Using internet resources for remote language learning / Z.-Y. Liu, N. Spitsyna, S. Zubanova [et al.] // *International Journal of Emerging Technologies in Learning*. – 2020. – Vol. 15, № 13. – P. 22–33.
3. *Peng, H.-H.* The Effects of Virtual Learning Environment on High School Students' English Learning Performance and Attitude / H.-H. Peng, Y.-T. Lin, T.-L. Wu // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. – 2019. – 11937. – P. 815–824.
4. *Ismiyani, N.* The perceptions of educators for gamification approach: The effectiveness of kahoot in teaching English / N. Ismiyani // *Asian EFL Journal*. – 2020. – Vol. 27. – P. 219–236.
5. *Shadiev, R.* Review of studies on technology-enhanced language learning and teaching / R. Shadiev, M. Yang // *Sustainability*. – 2020. – Vol. 12, № 2. – P. 524. – DOI: 10.3390/su12020524.
6. *Coates, G.* Program from Invisible Site – a virtual show, a multimedia performance work presented by George Coates Performance Works / G. Coates. – San Francisco, CA, 1992.

7. First person experience of body transfer in virtual reality / M. Slater, B. Spanlang, M. V. Sanchez-Vives [et al.] // PLoS ONE. – 2010. – Vol. 5, № 5. – P. 1–9. – DOI: 10.1371/journal.pone.0010564.
8. Presence and performance within virtual environments / W. Barfield, D. Zeltzer, T. Sheridan [et al.] // Virtual environments and advanced interface design. –1995. – P. 473–513.
9. *Bystrom, K. E.* A conceptual model of the sense of presence in virtual environments / K. E. Bystrom, W. Barfield, C. Hendrix // Presence: Teleoperators and Virtual Environments. – 1999. – Vol. 8, № 2. – P. 241–244. – DOI: 10.1162/105474699566107.
10. The use of immersive virtual reality (VR) to predict the occurrence 6 months later of paranoid thinking and posttraumatic stress symptoms assessed by self-report and interviewer methods: a study of individuals who have been physically assaulted / D. Freeman, A. Antley, A. Ehlers [et al.] // Psychological Assessment. – 2014. – Vol. 26, № 3. – P. 841–847. – DOI: 10.1037/a0036240.
11. *MacDonald, J.* Systematic Approaches to a Successful Literature Review / J. MacDonald // Journal of the Canadian Health Libraries Association. – 2014. – Vol. 34, № 1. – P. 46–47. – DOI: 10.5596/c13-009.
12. *Chen, Y. L.* The Effects of Virtual Reality Learning Environment on Student Cognitive and Linguistic Development / Y. L. Chen // Asia-Pacific Education Researcher. – 2016. – Vol. 25, № 4. – P. 637–646. – DOI: 10.1007/s40299-016-0293-2.
13. Affordance Compatibility Effect for Word Learning in Virtual Reality / C. L. Gordon, T. M. Shea, D. C. Noelle [et al.] // Cognitive Science. – 2019. – Vol. 43, № 6. – P. e12742. – DOI: 10.1111/cogs.12742.
14. A virtual reality experience for learning languages / S. Garcia, D. Laesker, M. Andujar [et al.] // Conference on Human Factors in Computing Systems Proceedings. – 2019. – P. 1–4. – DOI: 10.1145/3290607.3313253.
15. *Repetto, C.* Is motor simulation involved during foreign language learning? A virtual reality experiment / C. Repetto, B. Colombo, G. Riva // SAGE Open. – 2015. – Vol. 5, № 4. – P. 2158244015609964. – DOI: 10.1177/2158244015609964.
16. *Ebert, D.* Ogma – A virtual reality language acquisition system / D. Ebert, S. Gupta, F. Makedon // ACM International Conference Proceeding Series. – 2016. – DOI: 10.1145/2910674.2910681.
17. *Hu, X.-Q.* The Research on Chinese Idioms Educational Games in TCFL Based on Virtual Reality / X.-Q. Hu, R. Su, L. He // ITM Web of Conferences. – 2016. – Vol. 7. – P. 09011. – DOI: 10.1051/itmconf/20160709011.
18. Virtual reality in education: Learning a foreign language / D. Pinto, B. Peixoto, A. Krassmann [et al.] // New Knowledge in Information Systems and Technologies. – 2019. – Vol. 3. – P. 589–597. – DOI: 10.1007/978-3-030-16187-3\_57.
19. Language Learning in a Cognitive and Immersive Environment Using Contextualized Panoramic Imagery / S. Chabot, J. Drozdal, Y. Zhou [et al.] // Communications in Computer and Information Science. – 2019. – P. 202–209. – DOI: 10.1007/978-3-030-23525-3\_26.
20. SeLL: Second language learning paired with VR and AI / J. Guo, Y. Chen, Q. Pei [et al.] // SIGGRAPH Asia 2017 Symposium on Education. – 2017. – P. 1, 2. – DOI: 10.1145/3134368.3139213.
21. Virtual Reality in Teaching of Foreign Languages / V. Dobrova, K. Trubitsin, P. Labzina [et al.] // 7th International Scientific and Practical Conference "Current issues of linguistics and didactics: The interdisciplinary approach in humanities" (CILDIAH 2017). – 2017. – P. 69–74. – DOI: 10.2991/cildiah-17.2017.12.
22. *Jia, T.* Words in Kitchen: An instance of leveraging virtual reality technology to learn vocabulary / T. Jia, Y. Liu // Adjunct Proceedings of the 2019 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR-Adjunct). – 2019. – P. 150–155. – DOI: 10.1109/ISMAR-Adjunct.2019.00-59.
23. *Urueta, S. H.* A TEFL virtual reality system for high-presence distance learning / S. H. Urueta, T. Ogi // Advances in Networked-based Information Systems: The 22nd International Conference on Network-Based Information Systems (NBIS-2019). – 2020. – P. 359–368. – DOI: 10.1007/978-3-030-29029-0\_33.
24. University EAP students' perceptions of using a prototype virtual reality learning environment to learn writing structure / A. Pack, A. Barrett, H. N. Liang [et al.] // International Journal of Computer-Assisted Language Learning and Teaching. – 2020. – Vol. 10, № 1. – P. 27–46. – DOI: 10.4018/IJCALLT.2020010103.

25. *Parmaxi, A.* Virtual reality in language learning: A systematic review and implications for research and practice / A. Parmaxi // *Interactive learning environments*. – 2020. – Vol. 31, № 1. – P. 172–184. – DOI: 10.1080/10494820.2020.1765392.
26. *Chen, B.* The effects of virtual reality-assisted language learning: A meta-analysis / B. Chen, Y. Wang, L. Wang // *Sustainability*. – 2022. – Vol. 14, № 6. – P. 3147. – DOI: 10.3390/su14063147.
27. A systematic review of AR and VR enhanced language learning / X. Huang, D. Zou, G. Cheng [et al.] // *Sustainability*. – 2021. – Vol. 13, № 9. – P. 4639. – DOI: 10.3390/su13094639.
28. *Shadiev, R.* Cross-cultural learning in virtual reality environment: facilitating cross-cultural understanding, trait emotional intelligence, and sense of presence / R. Shadiev, X. Wang, Y. M. Huang // *Educational Technology Research and Development*. – 2021. – Vol. 69, № 5. – P. 2917–2936. – DOI: 10.1007/s11423-021-10044-1.

### **Сведения об авторах:**

**Буторова Анастасия Сергеевна**, младший научный сотрудник лаборатории искусственного интеллекта и сложных систем Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия; аспирант, младший научный сотрудник лаборатории искусственного интеллекта Института радиоэлектроники и информационных технологий-РТФ Уральского федерального университета им. Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия. Эл. почта: a.s.butorova@urfu.ru.

**Косаченко Александра Ильинична**, аспирант Уральского гуманитарного института Уральского федерального университета им. Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия.

**Тарасов Дмитрий Александрович**, аспирант, лаборант лаборатории нейротехнологий Уральского гуманитарного института Уральского федерального университета им. Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия.

**Сергеев Александр Петрович**, к. ф.-м. н., ведущий научный сотрудник, и. о. заведующего лабораторией искусственного интеллекта и сложных систем Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия; доцент, заведующий лабораторией искусственного интеллекта Института радиоэлектроники и информационных технологий-РТФ Уральского федерального университета им. Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия.

## IMMERSIVE VIRTUAL REALITY TO LEARNING FOREIGN LANGUAGES BY ADULTS: REVIEW ON 2014–2020

A. S. Butorova <sup>1</sup>, A. I. Kosachenko <sup>2</sup>, D. A. Tarasov <sup>2</sup>, A. P. Sergeev <sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Ekaterinburg, Russia*

<sup>2</sup> *Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin,  
Ekaterinburg, Russia*

*The process of globalization is inextricably connected with cross-cultural communications, and as a result, with the need to increase the effectiveness of learning foreign languages. Immersion in the environment of native speakers, implemented in virtual reality, could help to solve this problem. The application of virtual reality technology to the educational process raises the issues of identifying factors that affect the effectiveness of such learning. In this work, publications for analysis were collected from international scientific databases Scopus, Web of Science, PubMed according to a query formulated by the authors. The resulting sample contained 733 scientific sources. The final selection of sources was carried out according to three criteria: 1) the use of immersive virtual reality systems HTC Vive, HTC VIVE PRO, Oculus Rift, 2) the presence of a formative experiment aimed at acquiring knowledge in the language, 3) adults without clinical complications learn a second language. As a result, 13 experimental works were selected. These works were classified on the orientation of the simulator and on the formalization of the task. Papers on the orientation of the simulator were divided into speaking skills, memory, listening, social interaction and writing. According to the formalization of the task, simulators with free study of the environment and with strictly regulated tasks were allocated. The part of works dealt with the learning of a foreign language using immersive virtual reality was 1.8% (13 works out of the original 733). Of the 13 experimental studies, 8 showed a positive effect from the use of immersive virtual reality in learning a foreign language, the remaining 5 studies did not contain estimates of the effect.*

**Key words:** immersive virtual reality; foreign language; studying; simulator.

### References

1. Fan, S. Technology-enhanced collaborative language learning: theoretical foundations, technologies, and implications / S. Fan, Zou Di // *Computer Assisted Language Learning*. – 2022. – Vol. 35, № 8. – P. 1754–1788. – DOI: 10.1080/09588221.2020.1831545.
2. Using internet resources for remote language learning / Z.-Y. Liu, N. Spitsyna, S. Zubanova [et al.] // *International Journal of Emerging Technologies in Learning*. – 2020. – Vol. 15, № 13. – P. 22–33.
3. Peng, H.-H. The Effects of Virtual Learning Environment on High School Students' English Learning Performance and Attitude / H.-H. Peng, Y.-T. Lin, T.-L. Wu // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. – 2019. – 11937. – P. 815–824.
4. Ismiyani, N. The perceptions of educators for gamification approach: The effectiveness of kahoot in teaching English / N. Ismiyani // *Asian EFL Journal*. – 2020. – Vol. 27. – P. 219–236.
5. Shadiev, R. Review of studies on technology-enhanced language learning and teaching / R. Shadiev, M. Yang // *Sustainability*. – 2020. – Vol. 12, № 2. – P. 524. – DOI: 10.3390/su12020524.
6. Coates, G. Program from Invisible Site – a virtual show, a multimedia performance work presented by George Coates Performance Works / G. Coates. – San Francisco, CA, 1992.
7. First person experience of body transfer in virtual reality / M. Slater, B. Spanlang, M. V. Sanchez-Vives [et al.] // *PLoS ONE*. – 2010. – Vol. 5, № 5. – P. 1–9. – DOI: 10.1371/journal.pone.0010564.
8. Presence and performance within virtual environments / W. Barfield, D. Zeltzer, T. Sheridan [et al.] // *Virtual environments and advanced interface design*. – 1995. – P. 473–513.



9. *Bystrom, K. E.* A conceptual model of the sense of presence in virtual environments / K. E. Bystrom, W. Barfield, C. Hendrix // *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*. – 1999. – Vol. 8, № 2. – P. 241–244. – DOI: 10.1162/105474699566107.
10. The use of immersive virtual reality (VR) to predict the occurrence 6 months later of paranoid thinking and posttraumatic stress symptoms assessed by self-report and interviewer methods: a study of individuals who have been physically assaulted / D. Freeman, A. Antley, A. Ehlers [et al.] // *Psychological Assessment*. – 2014. – Vol. 26, № 3. – P. 841–847. – DOI: 10.1037/a0036240.
11. *MacDonald, J.* Systematic Approaches to a Successful Literature Review / J. MacDonald // *Journal of the Canadian Health Libraries Association*. – 2014. – Vol. 34, № 1. – P. 46–47. – DOI: 10.5596/c13-009.
12. *Chen, Y. L.* The Effects of Virtual Reality Learning Environment on Student Cognitive and Linguistic Development / Y. L. Chen // *Asia-Pacific Education Researcher*. – 2016. – Vol. 25, № 4. – P. 637–646. – DOI: 10.1007/s40299-016-0293-2.
13. Affordance Compatibility Effect for Word Learning in Virtual Reality / C. L. Gordon, T. M. Shea, D. C. Noelle [et al.] // *Cognitive Science*. – 2019. – Vol. 43, № 6. – P. e12742. – DOI: 10.1111/cogs.12742.
14. A virtual reality experience for learning languages / S. Garcia, D. Laesker, M. Andujar [et al.] // *Conference on Human Factors in Computing Systems Proceedings*. – 2019. – P. 1–4. – DOI: 10.1145/3290607.3313253.
15. *Repetto, C.* Is motor simulation involved during foreign language learning? A virtual reality experiment / C. Repetto, B. Colombo, G. Riva // *SAGE Open*. – 2015. – Vol. 5, № 4. – P. 2158244015609964. – DOI: 10.1177/2158244015609964.
16. *Ebert, D.* Ogma – A virtual reality language acquisition system / D. Ebert, S. Gupta, F. Makedon // *ACM International Conference Proceeding Series*. – 2016. – DOI: 10.1145/2910674.2910681.
17. *Hu, X.-Q.* The Research on Chinese Idioms Educational Games in TCFL Based on Virtual Reality / X.-Q. Hu, R. Su, L. He // *ITM Web of Conferences*. – 2016. – Vol. 7. – P. 09011. – DOI: 10.1051/itmconf/20160709011.
18. Virtual reality in education: Learning a foreign language / D. Pinto, B. Peixoto, A. Krassmann [et al.] // *New Knowledge in Information Systems and Technologies*. – 2019. – Vol. 3. – P. 589–597. – DOI: 10.1007/978-3-030-16187-3\_57.
19. Language Learning in a Cognitive and Immersive Environment Using Contextualized Panoramic Imagery / S. Chabot, J. Drozdal, Y. Zhou [et al.] // *Communications in Computer and Information Science*. – 2019. – P. 202–209. – DOI: 10.1007/978-3-030-23525-3\_26.
20. SeLL: Second language learning paired with VR and AI / J. Guo, Y. Chen, Q. Pei [et al.] // *SIGGRAPH Asia 2017 Symposium on Education*. – 2017. – P. 1, 2. – DOI: 10.1145/3134368.3139213.
21. Virtual Reality in Teaching of Foreign Languages / V. Dobrova, K. Trubitsin, P. Labzina [et al.] // *7th International Scientific and Practical Conference "Current issues of linguistics and didactics: The interdisciplinary approach in humanities" (CILDIAH 2017)*. – 2017. – P. 69–74. – DOI: 10.2991/cildiah-17.2017.12.
22. *Jia, T.* Words in Kitchen: An instance of leveraging virtual reality technology to learn vocabulary / T. Jia, Y. Liu // *Adjunct Proceedings of the 2019 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR-Adjunct)*. – 2019. – P. 150–155. – DOI: 10.1109/ISMAR-Adjunct.2019.00-59.
23. *Urueta, S. H.* A TEFL virtual reality system for high-presence distance learning / S. H. Urueta, T. Ogi // *Advances in Networked-based Information Systems: The 22nd International Conference on Network-Based Information Systems (NBIS-2019)*. – 2020. – P. 359–368. – DOI: 10.1007/978-3-030-29029-0\_33.
24. University EAP students' perceptions of using a prototype virtual reality learning environment to learn writing structure / A. Pack, A. Barrett, H. N. Liang [et al.] // *International Journal of Computer-Assisted Language Learning and Teaching*. – 2020. – Vol. 10, № 1. – P. 27–46. – DOI: 10.4018/IJCALLT.2020010103.
25. *Parmaxi, A.* Virtual reality in language learning: A systematic review and implications for research and practice / A. Parmaxi // *Interactive learning environments*. – 2020. – Vol. 31, № 1. – P. 172–184. – DOI: 10.1080/10494820.2020.1765392.

26. *Chen, B.* The effects of virtual reality-assisted language learning: A meta-analysis / B. Chen, Y. Wang, L. Wang // Sustainability. – 2022. – Vol. 14, № 6. – P. 3147. – DOI: 10.3390/su14063147.
27. A systematic review of AR and VR enhanced language learning / X. Huang, D. Zou, G. Cheng [et al.] // Sustainability. – 2021. – Vol. 13, № 9. – P. 4639. – DOI: 10.3390/su13094639.
28. *Shadiev, R.* Cross-cultural learning in virtual reality environment: facilitating cross-cultural understanding, trait emotional intelligence, and sense of presence / R. Shadiev, X. Wang, Y. M. Huang // Educational Technology Research and Development. – 2021. – Vol. 69, № 5. – P. 2917–2936. – DOI: 10.1007/s11423-021-10044-1.

## ОБОБЩЕННЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВЫ И РАСТИТЕЛЬНОСТИ МЕДЬЮ И ЦИНКОМ В РАЙОНЕ МЕДНОКОЛЧЕДАННОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

А. Н. Медведев, М. А. Медведев

*Институт промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия*

*Статья посвящена вопросам развития методики экологического мониторинга зоны влияния медноколчеданных месторождений с изучением загрязнения почвы и травянистой растительности рудными металлами. На основе анализа известных исследований о закономерностях миграции меди и цинка в системе «почва – растение» высказана гипотеза о перспективности использования обобщенного показателя  $K_0$ , представляющего собой сумму отнесенных к нормативным значениям концентраций меди и цинка в почве и растительности. Проверка гипотезы с использованием данных натурального опробования показала, что положение отвала вскрышных пород медноколчеданного карьера на профиле четко фиксируется по увеличению  $K_0$  на 60–120 % в ближайших к отвалу точках. С учетом имеющихся данных о разном характере накопления меди и цинка в разных видах растительности сделан вывод о том, что предложенный обобщенный показатель может быть рекомендован для использования в экологическом мониторинге зоны влияния медноколчеданных месторождений для повышения информативности и достоверности исследований.*

**Ключевые слова:** мониторинг; загрязнение; почва; травянистая растительность; медь; цинк; медноколчеданное месторождение.

### 1. Введение

Технологические процессы и отходы горных предприятий обуславливают загрязнения почвы в районе их размещения. Почвы накапливают входящие в состав руд тяжелые металлы и могут служить индикатором экологической обстановки территории, поэтому изучение загрязнения почвы широко используется при экологическом мониторинге зоны возможного влияния горных предприятий. Повышение содержания тяжелых металлов в почве ведет к их миграции в произрастающую на загрязненных территориях естественную травянистую растительность и сельскохозяйственные культуры и к возможному поступлению в организм животных и человека [1–4].

Экспериментальные исследования [5] показали, что накопление таких металлов, как медь и цинк, в травянистой растительности происходит по-разному, в частности, цинк и медь по степени подвижности можно расположить в следующий ряд:  $Zn > Cu$ . Авторы отмечают, что медь образует более прочные специфические связи с компонентами почвы, чем цинк, который связывается неспецифическим образом и имеет более высокую подвижность. В работах [6, 7] была отмечена разная интенсивность накопления металлов в различных видах растительности, а также было получено, что поглощение тяжелых металлов может иметь барьерный характер и уменьшаться при наличии избыточных количеств металлов в почве, не превышающих критических для растительности уровней.

Учитывая указанные особенности, в районах добычи медноколчеданных руд целесообразно контролировать состояние не только почвы, что в соответствии с нормативными документами является обязательным компонентом производственного экологического контроля (ПЭК) [8], но и растительности для получения более достоверной информации о загрязнении территории рудными металлами.

Институтом промышленной экологии УрО РАН в рамках реализации программы экологического мониторинга и ПЭК зоны влияния Сафьяновского медноколчеданного месторождения (район г. Режа Свердловской области) выполнялись исследования

загрязнения почвы и растительности. Они показали, что концентрации рудных металлов меди и цинка в большинстве точек опробования оставались ниже предельно допустимых концентраций (ПДК) в почве [9] и максимальных допустимых уровней (МДУ) в растительности [10, 11]. Относительно повышенные значения концентраций наблюдались только в непосредственной близости от породных отвалов, причем в разных точках для почвы и растительности [12], что согласуется с выводами работ [1, 5, 6].

Кроме того, было получено, что мониторинг загрязнения растительности тяжелыми металлами (рудные металлы: медь и цинк, микроэлементы: никель, свинец, кадмий, мышьяк) с применением кластерного анализа в качестве метода классификации точек опробования является более информативным видом исследования [12], чем мониторинг загрязнения почвы, т. к. позволяет выделить в разные кластеры точки с различным механизмом загрязнения (преимущественно загрязнение подотвальными водами, аэрогенное загрязнение, фоновые точки).

Таким образом, мониторинг загрязнения почвы и травянистой растительности представляет собой два вида исследований, совместное использование которых может дать более достоверную информацию об уровне и масштабе загрязнения территории в районе горного предприятия рудными металлами. Учитывая отмеченные многими авторами особенности накопления тяжелых металлов в почве и растительности при различных уровнях загрязнения [1, 5–7], была высказана гипотеза о перспективности использования показателя, обобщающего данные этих исследований.

Настоящая статья посвящена оценке целесообразности использования обобщенного показателя загрязнения почвы и растительности в районе размещения карьера медноколчеданных руд с целью возможного повышения контрастности выделения относительно более загрязненных точек территории на общем фоне.

## **2. Материалы и методы**

Оценка выполнена с использованием результатов химического анализа проб почвы и растительности, отобранных в июле 2018 г. в 8 точках, расположенных на одном профиле, проходящем вблизи Сафьяновского карьера (рис. 1). Использование данных 2018 г. обусловлено тем, что в 2019 г. в связи с изменением нормативных требований и низким влиянием карьера на состояние почвы и растительности за пределами его санитарно-защитной зоны (1 000 м) программа ПЭК была существенно сокращена, а новые данные в необходимом для оценки объеме отсутствуют.

Пробы почвы отбирались в соответствии с принятыми в эколого-геохимических исследованиях методиками [13, 14] с глубины 0–15 см методом квадратного конверта. Вес сборной пробы составлял не менее 0,5 кг. Пробоподготовка включала сушку на воздухе, дробление, растирание в порошок, просеивание, растворение в кислотах. Отбор растительности проводился параллельно в тех же точках посредством срезания надземной части травянистых растений и получения объединенной пробы весом не менее 0,5 кг. Пробоподготовка включала сушку на воздухе, резку, озоление проб.

Химический анализ выполнялся в аккредитованной лаборатории АО «Сафьяновская медь». Методика выполнения измерений [15] и относительная погрешность химического анализа для меди и цинка, а также нормативы ПДК [9] и МДУ [10, 11] этих металлов для почвы и растительности приведены в табл. 1, результаты измерений – в табл. 2.

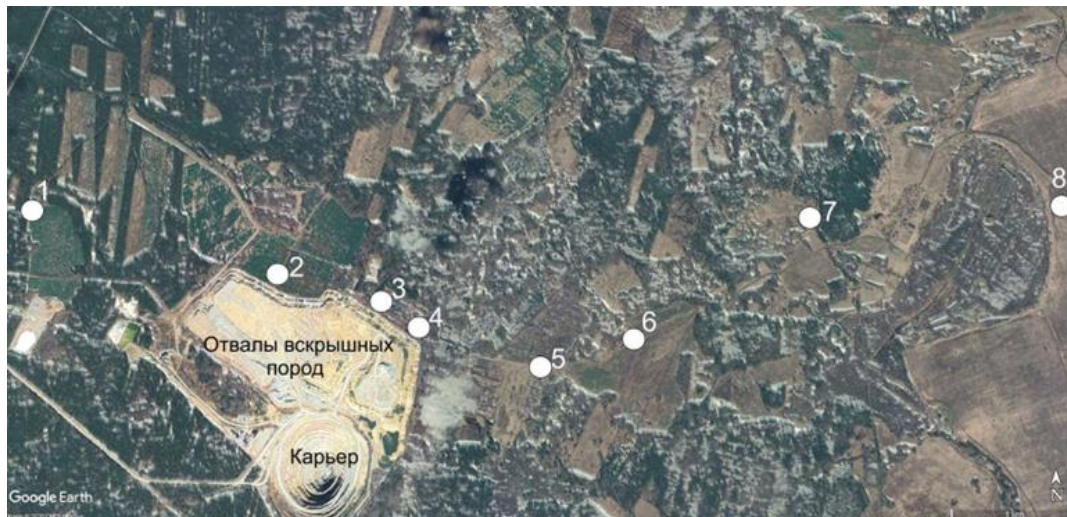


Рис. 1. Схема расположения точек отбора проб почвы и травянистой растительности в районе Сафьяновского карьера, М 1:50 000 (подложка – Google Earth 2018)

Таблица 1. Методы и погрешности измерений

Показатель	Нормативный документ на методику измерений	Относительная погрешность, %	ПДК, мг/кг (с учетом фона/кларка)	МДУ, мг/кг
Медь	ПНД Ф 16.1:2:3:3.11-98	20	132	30
Цинк	ПНД Ф 16.1:2:3:3.11-98	20	220	50

Таблица 2. Результаты химического анализа проб почвы и растительности, мг/кг

Элемент	Номер точки	Содержание в почве, мг/кг	Содержание в травянистой растительности, мг/кг
Медь	1	24,7	14,4
	2	23,3	12,7
	3	34,8	13,6
	4	24,4	14,3
	5	33,9	13,2
	6	30	10,7
	7	34,8	11,2
	8	28,5	12,3
Цинк	1	71,4	26,9
	2	62,4	121,4
	3	66,3	83,1
	4	60,7	74,6
	5	61,1	30,2
	6	65,2	24,5
	7	72,8	23,2
	8	69,4	23,3

### 3. Результаты и обсуждение

По результатам измерений (табл. 2) построены графики отнесенных к ПДК концентраций меди (Кмп) и цинка (Кцп) в почве (рис. 2) и отнесенных к МДУ концентраций меди (Кмр) и цинка (Кцр) в растительности (рис. 3).

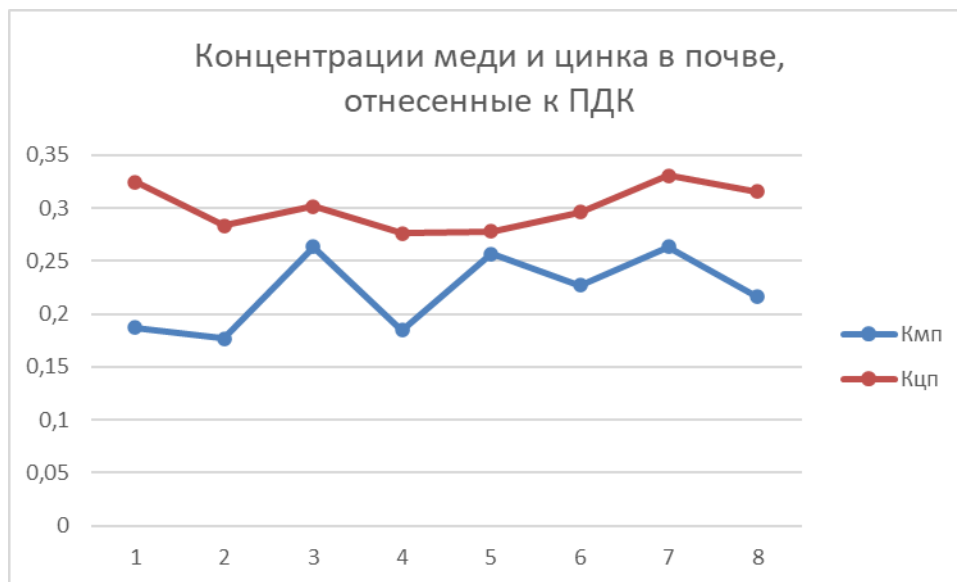


Рис. 2. Концентрации меди (Кмп) и цинка (Кцп) в почве, отнесенные к ПДК, для точек опробования 1–8

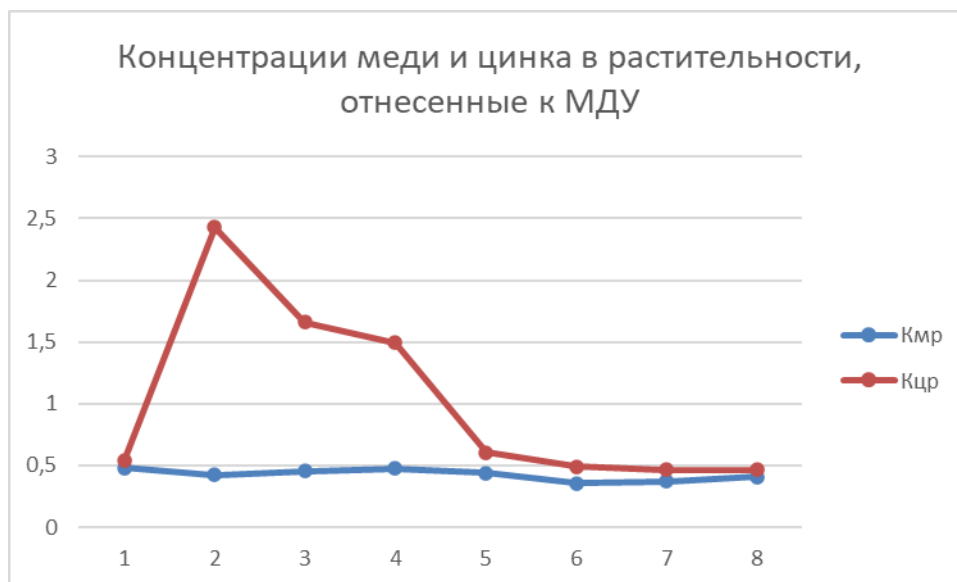


Рис. 3. Концентрации меди (Кмр) и цинка (Кцр) в растительности, отнесенные к МДУ, для точек опробования 1–8

Как видно из графика рис. 2, концентрации меди и цинка в почве существенно ниже ПДК (в 3–5,5 раза). Наличие на профиле карьера и отвалов не проявляется; наблюдаются незначительные (5–20 %) разнонаправленные колебания Кмп и Кцп, не связанные с расположением точек опробования относительно карьера и отвалов. Относительно повышенные значения Кмп и Кцп наблюдаются как вблизи отвалов (точка 3), так и на значительном удалении от них (точки 5 и 7 по меди, 1 и 7 по цинку).

Концентрации меди в растительности также существенно ниже МДУ (в 2–2,8 раза) и незначительно изменяются по профилю от 0,36 до 0,48 МДУ.

В то же время на графике для относительной концентрации цинка в растительности Кцр (рис. 3) контрастно выделяются точки 2, 3, 4, расположенные в непосредственной близости (порядка 20 м) от подошвы отвала вскрышных пород (увеличение Кцр в 2,5–4,5 раза).

Данный результат подтверждает полученный ранее вывод [12] о том, что мониторинг загрязнения растительности является на данном объекте более информативным видом исследования по сравнению с изучением загрязнения почвы.

Причем основную полезную информацию несут данные о загрязнении цинком, что согласуется с выводами исследований [5–7] и объясняется большей подвижностью цинка по сравнению с медью в системе «почва – растение» для многих видов травянистой растительности. На графике по меди также наблюдаются относительно повышенные значения  $K_{мр}$  в точках 3, 4, 5 (до 30 % при относительной погрешности измерений 20 %), т. е. имеет место локальный максимум малой амплитуды, несколько смещенный по профилю относительно расположения ближайших к отвалам точек. Поэтому данные о концентрации меди в растительности также несут полезную информацию о расположении отвалов относительно точек профиля.

С учетом того, что рудные элементы поступают в почву и затем мигрируют в системе «почва – растение», было высказано предположение о перспективности использования в экологическом мониторинге обобщенных показателей загрязнения почвы и растительности по меди  $K_{мо}$  и цинку  $K_{цо}$ :

$$K_{мо} = K_{мп} + K_{мр},$$

$$K_{цо} = K_{цп} + K_{цр},$$

а также обобщенного показателя  $K_o$  загрязнения почвы и растительности суммарно по меди и цинку:

$$K_o = K_{мо} + K_{цо}.$$

На рис. 4 представлены графики указанных обобщенных показателей по профилю.

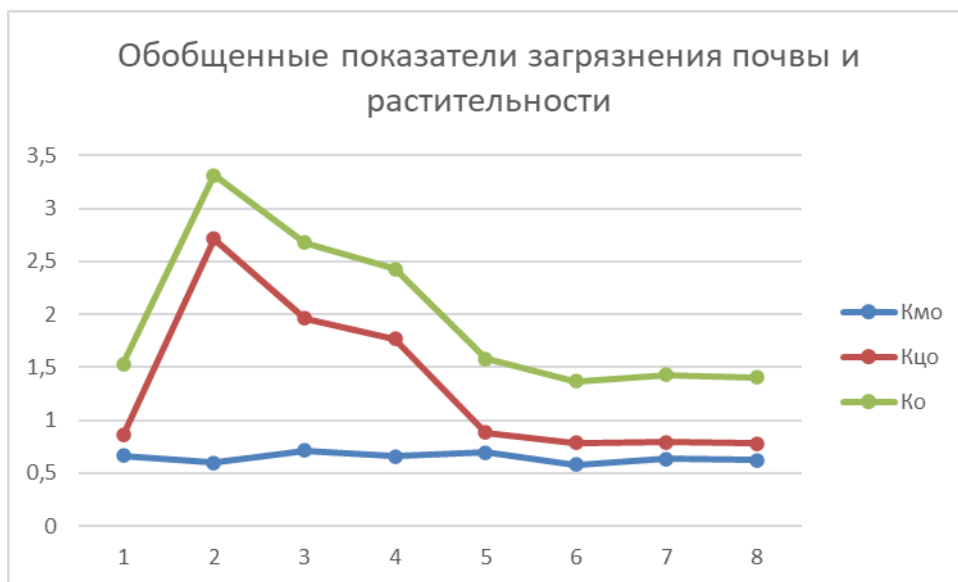


Рис. 4. Обобщенные показатели загрязнения почвы и растительности медью и цинком

Как видно из рис. 4, обобщенные показатели по меди  $K_{мо}$  и цинку  $K_{цо}$  повторяют форму графиков относительных концентраций меди и цинка в растительности  $K_{мр}$  и  $K_{цр}$  (рис. 3) с общим увеличением уровня на 0,2–0,3 ед. за счет вклада относительных концентраций меди и цинка в почве (рис. 2). При этом амплитуда максимума на графике  $K_{цо}$  несколько уменьшилась по сравнению с показателем  $K_{цр}$  и превышает фон (точки 1, 5) в 3,1–3,2 раза.

Показатель  $K_{мо}$  малоинформативен (как и  $K_{мр}$ ); относительно повышенные значения наблюдаются в точках 3, 4, 5 аналогично графику  $K_{мр}$  (рис. 3), амплитуда максимума не превышает 20 %.

График обобщенного показателя  $K_o$  повторяет форму графиков для  $K_{цо}$  и  $K_{цр}$ . В ближайших к отвалам точках 2, 3, 4 наблюдаются повышенные в 1,6–2,2 раза (на 60–120 %) значения  $K_o$ , что меньше, чем для показателя  $K_{цр}$  (превышение в 2,5–4,5 раза над фоном), тем не менее положение отвалов на профиле по показателю  $K_o$  четко фиксируется с учетом того, что относительная погрешность измерений составляла 20 %.

Авторы многих исследований отмечают, что при общей более высокой подвижности цинка по сравнению с медью в системе «почва – растение» накопление этих металлов в разных видах травянистой растительности происходит по-разному и данный вопрос недостаточно изучен [1, 5–7]. В связи с этим можно ожидать, что в других точках окрестностей рассматриваемого карьера и отвалов, где произрастают другие виды травянистой растительности, может наблюдаться более интенсивная аккумуляция меди в растительности и могут быть получены более контрастные графики для обобщенного показателя загрязнения  $K_0$ , что даст дополнительную информацию для локализации источника загрязнения.

#### 4. Заключение

Анализ известных исследований показал, что характер аккумуляции меди и цинка из почвы различается для разных видов травянистой растительности, что позволило высказать гипотезу о перспективности использования при экологическом мониторинге зоны влияния медного рудника обобщенного показателя  $K_0$ , представляющего собой сумму нормированных к величинам нормативов ПДК и МДУ концентраций меди и цинка в почве и растительности точек опробования.

Проверка гипотезы с использованием данных опробования почвы и растительности показала, что положение отвалов вскрышных пород медноколчеданного карьера на профиле четко фиксируется по увеличению  $K_0$  на 60–120 % в ближайших к отвалу точках.

Амплитуда повышенных значений  $K_0$  меньше по сравнению с относительным показателем загрязнения растительности цинком  $K_{цр}$ , который в рассматриваемом случае невысокого уровня загрязнения (24–35 мг/кг меди в почве и 11–14 мг/кг в растительности; 61–73 мг/кг цинка в почве и 23–121 мг/кг в растительности) является наиболее информативным, что согласуется с данными других исследований.

При общей более высокой подвижности цинка по сравнению с медью в системе «почва – растение» накопление этих металлов в разных видах травянистой растительности происходит по-разному; данный вопрос недостаточно изучен, что отмечено многими авторами.

В связи с этим можно ожидать, что в других точках окрестностей карьера и отвалов, где произрастают другие виды трав, могут быть получены более контрастные графики для обобщенного показателя загрязнения  $K_0$ , что даст дополнительную информацию для локализации источника загрязнения.

Таким образом, обобщенный показатель загрязнения почвы и травянистой растительности медью и цинком может быть рекомендован для использования при экологическом мониторинге зоны влияния медноколчеданных месторождений для повышения информативности и достоверности исследований.

#### 5. Список литературы

1. Кужина, Г. Ш. Исследование содержания тяжелых металлов в почвах и растительности в окрестностях недействующих и отработанных карьеров Башкирского Зауралья / Г. Ш. Кужина, Г. А. Ягафарова, С. И. Янтурин // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2014. – № Т. 20. – С. 2426–2430. – EDN QNMENO.
2. Хабибуллина, Ф. М. Трансформация растительности, почв и почвенной микробиоты в зоне воздействия породных отвалов угольной шахты «Воркутинская» / Ф. М. Хабибуллина, Е. Г. Кузнецова, А. Н. Панюков // Теоретическая и прикладная экология. – 2015. – № 4. – С. 30–37. – EDN VLEZSP.
3. Leila, B. Impacts of mining activities on soil properties: case studies from Morocco mine sites / B. Leila, B. Loubna, B. Ali // Soil Science Annual. – 2021. 71(4): 395–407. – DOI:10.37501/soilsa/133011.
4. Heavy Metal Migration in Soil-Plant System in Conditions of Urban Environmental Pollution / A. Petukhov, T. Kremleva, N. Khritokin, G. Petukhova // Air, Soil and Water Research. – 2023. – Vol. 16. – DOI 10.1177/11786221231184202. – EDN QFIUTS.



5. *Жаркова, Н. Н.* Интенсивность биологического накопления микроэлементов (цинка и меди) растениями *Echinacea purpurea* L. в условиях Западной Сибири / Н. Н. Жаркова, В. В. Сухоцкая, Ю. И. Ермохин // Овощи России. – 2020. – № 2. – С. 87–90. – DOI 10.18619/2072-9146-2020-2-87-90. – EDN PONXBA.
6. *Popova, E.* Accumulation of heavy metals in soil and plants adjacent to municipal solid waste disposal facility / E. Popova // Journal of Physics: Conference Series, Tomsk, 24–27 апреля 2018 года. – Vol. 1145. – Tomsk: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012021. – DOI 10.1088/1742-6596/1145/1/012021. – EDN XLBNJT.
7. *Спицына, С. Ф.* Физиологические барьеры при поглощении меди, цинка и марганца растениями из почвы в условиях равнинной части Алтайского края / С. Ф. Спицына, А. А. Томаровский, Г. В. Оствальд // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2014. – № 7(117). – С. 56–59. – EDN SJIQSF.
8. Приказ Минприроды России от 08.12.2020 № 1030 «Об утверждении Порядка проведения собственниками объектов размещения отходов, а также лицами, во владении или в пользовании которых находятся объекты размещения отходов, мониторинга состояния и загрязнения окружающей среды на территориях объектов размещения отходов и в пределах их воздействия на окружающую среду» (Зарегистрировано в Минюсте России 25.12.2020 № 61832).
9. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. СанПиН 1.2.3685-21 (Зарегистрировано в Минюсте России 29.01.2021 № 62296).
10. *Антонов, Б. И.* Лабораторные исследования в ветеринарии / Б. И. Антонов // Химико-токсикологические исследования. Гид. – М : «Агропромиздат», 1989.
11. Временный максимально-допустимый уровень (МДУ) содержания некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках (утв. Госагропромом СССР 07.08.1987). [https://e-ecolog.ru/docs/2\\_ZQ3WixyX-JDuUum-Sk7?utm\\_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F](https://e-ecolog.ru/docs/2_ZQ3WixyX-JDuUum-Sk7?utm_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F) (дата обращения: 10.08.2023).
12. *Medvedev, A.* About statistical analysis of environmental pollution monitoring data obtained in the vicinity of a copper quarry / A. Medvedev, M. Medvedev, N. Medvedev // AIP Conference Proceedings 2425, 110030 (2022); <https://doi.org/10.1063/5.0081589>. (дата обращения: 10.08.2023).
13. *Вострокнутов, Г. А.* Временное методическое руководство по проведению геохимических исследований при геоэкологических работах / Г. А. Вострокнутов // ПГО «Уралгеология». – Екатеринбург, 1991.
14. *Алексеевко, В. А.* Геохимия ландшафта и окружающая среда / В. А. Алексеевко – М.: Наука, 1990. – 142 с.
15. ПНД Ф 16.1:2:3:3.11-98. Методика выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. – М., 1998 (издание 2005 г.). <https://meganorm.ru/Data2/1/4293777/4293777593.pdf> (дата обращения: 18.08.2023).

#### **Сведения об авторах:**

**Медведев Александр Николаевич**, к. т. н., доцент, ведущий научный сотрудник Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия. Эл. почта: [amed@esko.uran.ru](mailto:amed@esko.uran.ru).

**Медведев Максим Александрович**, к. э. н., научный сотрудник Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия.

## GENERALIZED INDICATOR OF SOIL AND VEGETATION POLLUTION WITH COPPER AND ZINC IN THE AREA OF COPPER PYRITE ORE DEPOSIT

A. N. Medvedev, M. A. Medvedev

*Institute of Industrial Ecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Ekaterinburg, Russia*

*The article is devoted to the development of methodic for environmental monitoring of the copper pyrite deposits influence zone with the study of soil and herbaceous vegetation contamination with ore metals. Based on an analysis of known studies on the patterns of copper and zinc migration in the soil-plant system, a hypothesis has been put forward about the prospects of using the generalized indicator  $K_o$ , which is the sum of the normalized to standard values concentrations of copper and zinc in soil and vegetation. Testing the hypothesis using field sampling data showed that the position of the dump of overburden rocks of a copper pyrite quarry on the profile is clearly indicated by an increase in  $K_o$  by 60–120 % at the closest to the dump points. Taking into account the available data on the different nature of the copper and zinc accumulation in different types of vegetation, it was concluded that the proposed generalized indicator can be recommended for use in environmental monitoring of copper pyrite deposits influence zone to increase the information content and reliability of research.*

**Key words:** monitoring; pollution; soil; herbaceous vegetation; copper; zinc; copper pyrite deposit.

### References

1. Kuzina, G. Sh. The study of content of heavy metals in soils and vegetation in the vicinity of inactive and waste quarries the Bashkir Zauralye / G. Sh. Kuzina, G. A. Yagafarova, S. I. Janturin // Scientific and methodological electronic journal «Koncept». – 2014. – № V. 20. – P. 2426–2430. – EDN QNMENO [In Russian].
2. Khabibullina, F. M. Transformation of vegetation, soils, and soil microbiota in the impact zone of the coal mine "Vorkutinskaya" / F. M. Khabibullina, E. G. Kuznetsova, A. N. Panyukov // Theoretical and applied ecology. – 2015. – № 4. – P. 30–37. – EDN VLEZSP [In Russian].
3. Leila, B. Impacts of mining activities on soil properties: case studies from Morocco mine sites / B. Leila, B. Loubna, B. Ali // Soil Science Annual. – 2021. 71(4): 395–407. – DOI:10.37501/soilsa/133011.
4. Heavy Metal Migration in Soil-Plant System in Conditions of Urban Environmental Pollution / A. Petukhov, T. Kremleva, N. Khritokin, G. Petukhova // Air, Soil and Water Research. – 2023. – Vol. 16. – DOI 10.1177/11786221231184202. – EDN QFIUTS.
5. Zharkova, N. N. Intensity of biological accumulation of microelements (zinc and copper) plants of Echinacea purpurea L. under conditions of Western Siberia / N. N. Zharkova, V. V. Sukhotskaya, Yu. I. Ermokhin // Vegetables crops of Russia. – 2020. – № 2. – P. 87–90. – DOI 10.18619/2072-9146-2020-2-87-90. – EDN PONXBA [In Russian].
6. Popova, E. Accumulation of heavy metals in soil and plants adjacent to municipal solid waste disposal facility / E. Popova // Journal of Physics: Conference Series, Tomsk, 24–27 апреля 2018 года. – Vol. 1145. – Tomsk: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012021. – DOI 10.1088/1742-6596/1145/1/012021. – EDN XLBNJT.
7. Spitsyna, S. F. Physiological barriers in absorption of copper, zinc and manganese by plants from soil in the plain part of the altai region / S. F. Spitsyna, A. A. Tomarovskiy, G. V. Ostwald // Bulletin of Altai State Agricultural University. – 2014. – № 7(117). – P. 56–59. – EDN SJIQSF [In Russian].
8. Prikaz Minprirody Rossii ot 08.12.2020 N 1030 «Ob utverzhdenii Poryadka provedeniya sobstvennikami ob"ektov razmeshcheniya othodov, a takzhe licami, vo vladenii ili v pol'zovanii kotoryh nahodyatsya ob"ekty razmeshcheniya othodov, monitoringa sostoyaniya i zagryazneniya okruzhayushchej sredy na territoriyah ob"ektov razmeshcheniya othodov i v predelah ih vozdejstviya na okruzhayushchuyu sredyu» (Zaregistrovano v Minyuste Rossii 25.12.2020 N 61832). [In Russian].

9. Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov srede obitaniya. SanPiN 1.2.3685-21 (Zaregistrovano v Minyuste Rossii 29.01.2021 N 62296). [In Russian].
10. *Antonov, B. I.* Laboratornye issledovaniya v veterinarii / B. I. Antonov // Himiko-toksikologicheskie issledovaniya. Gid. – M : «Agropromizdat», 1989. [In Russian].
11. Vremennyy maksimal'no-dopustimyy uroven' (MDU) sodержaniya nekotoryh himicheskikh elementov i gossipola v kormah dlya sel'skohozyajstvennyh zhivotnyh i kormovyh dobavkah (utv. Gosagropromom SSSR 07.08.1987). [https://e-ecolog.ru/docs/2\\_ZQ3Wixyx-JDuUum-Sk7?utm\\_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F](https://e-ecolog.ru/docs/2_ZQ3Wixyx-JDuUum-Sk7?utm_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F) (accessed: 10.08.2023). [In Russian].
12. *Medvedev, A.* About statistical analysis of environmental pollution monitoring data obtained in the vicinity of a copper quarry / A. Medvedev, M. Medvedev, N. Medvedev // AIP Conference Proceedings 2425, 110030 (2022); <https://doi.org/10.1063/5.0081589>.
13. *Vostroknutov, G. A.* Vremennoe metodicheskoe rukovodstvo po provedeniyu geohimicheskikh issledovaniy pri geoekologicheskikh rabotah / G. A. Vostroknutov // PGO «Uralgeologiya». – Ekaterinburg, 1991. [In Russian].
14. *Alekseenko, V. A.* Geohimiya landshafta i okruzhayushchaya sreda / V. A. Alekseenko – M.: Nauka, 1990. – 142 p. [In Russian].
15. PND F 16.1:2:3:3.11-98. Metodika vypolneniya izmerenij sodержaniya metallov v tverdyh ob"ektah metodom spektrometrii s induktivno-svyazannoj plazmoj. – M., 1998 (izdanie 2005 g.). <https://meganorm.ru/Data2/1/4293777/4293777593.pdf> (accessed: 18.08.2023). [In Russian].

## ВЛИЯНИЕ УГЛОВОЙ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЗАВИСИМОСТЕЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ДОЗИМЕТРОВ НА ОЦЕНКУ ОБЛУЧЕНИЯ ПЕРСОНАЛА

И. С. Спиридонова<sup>1,2</sup>, М. Д. Пышкина<sup>2</sup>, А. В. Васильев<sup>2</sup>, А. А. Екидин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Уральский федеральный университет им. первого Президента России  
Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> Институт промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

*Исследованы энергетические и угловые зависимости чувствительности индивидуальных нейтронных дозиметров. Изучение геометрии облучения производилось путем моделирования, воспроизводящего полную картину взаимодействия нейтронного поля с фантомом. За счет информации об энергетической и угловой зависимостях чувствительности могут быть получены наиболее точные оценки эффективной дозы при воздействии нейтронного излучения. В работе представлены результаты расчета энергетических и угловых зависимостей чувствительности индивидуальных термолюминесцентных дозиметров нейтронов Harshaw 6776 и ДВГН-01. На основе полученных данных об откликах индивидуальных дозиметров была предложена методика оценки принятого значения эффективной дозы.*

**Ключевые слова:** индивидуальный дозиметр; индивидуальный дозиметрический контроль; энергетическая зависимость чувствительности; угловая зависимость чувствительности; методы оценки эффективной дозы.

### 1. Введение

Персонал объектов использования атомной энергии и предприятий атомной промышленности потенциально подвержен облучению нейтронным излучением. На этих объектах для оценки получаемых работниками доз облучения проводится дозиметрический контроль рабочего места (ДКРМ) и/или индивидуальный дозиметрический контроль (ИДК) в зависимости от потребностей [1]. Индивидуальный контроль проводится дозиметрами различных типов, отличающихся способами детектирования излучения, ситуациями их использования. На сегодняшний день наиболее широко применяемыми на территории РФ индивидуальными дозиметрами нейтронного излучения являются термолюминесцентные дозиметры Harshaw 6776 и ДВГН-01.

Используемые индивидуальные дозиметры не дают адекватной оценки значений попадающего в них излучения. Показания отличаются от эффективной дозы индивидуального дозиметра (ИД) при рассмотрении различных геометрий. В технических же паспортах ИД обозначены показания только для передне-задней (ПЗ) геометрии, для других направлений излучения показания указаны либо для определенных значений энергии, либо не указаны вовсе. Кроме того, отличие энергетической зависимости чувствительности (ЭЗЧ) индивидуальных дозиметров от ЭЗЧ дозиметрических характеристик приводит к значительным отличиям показаний индивидуальных дозиметров от дозиметрических характеристик поля в точке измерений [2]. При неизвестном энергетическом спектре измеряемого нейтронного потока это может приводить к непредсказуемому увеличению погрешностей. Важный фактор, влияющий на достоверность измерения – это угол падения нейтронного излучения на корпус индивидуального дозиметра, так как из-за несовершенства конструкции индивидуальные дозиметры обладают угловой зависимостью чувствительности, регистрируя большее количество нейтронов при нормальном их падении по сравнению с падением под углом [3]. Отсюда вытекает важность изучения

энергетических и угловых зависимостей чувствительности индивидуальных нейтронных дозиметров.

Цель выполненных исследований – получить энергетические и угловые зависимости чувствительности индивидуальных нейтронных термолюминесцентных дозиметров (ТЛД) Harshaw 6776 и ДВГН-01 и разработать методику оценки истинного значения эффективной дозы с учетом полученных энергетических и угловых зависимостей чувствительности.

Задачи исследования:

- создание моделей дозиметров в программе для моделирования;
- проведение моделирования облучения созданных индивидуальных дозиметров;
- получение энергетических зависимостей чувствительности для различных углов падения излучения;
- получение угловых зависимостей чувствительности для энергий различных величин;
- разработка методики оценки истинного значения эффективной дозы с учетом полученных энергетических и угловых зависимостей чувствительности.

## 2. Материалы и методы

Для получения энергетических и угловых зависимостей чувствительности термолюминесцентных индивидуальных дозиметров нейтронов использовалось ПО FLUKA [4] на основе метода Монте-Карло.

Основа разработки методики оценки принятого значения эффективной дозы – учет вклада падающего излучения не только на переднюю, но и на боковые и заднюю поверхности тела человека.

Исследуемая модель представляла собой сферу, изолированную от внешних воздействий слоем «черного тела». Внутри изолированной сферы расположен фантом, представленный параллелепипедом 30 x 30 x 15 см. Материал фантома соответствует составу мягких тканей, которые, согласно МКРЕ, включают 4 компонента: Н – 10 %, С – 11 %, N – 3 % и О – 76 % [5].

Модели индивидуальных дозиметров Harshaw 6776 и ДВГН-01 составлялись в соответствии с данными из технических паспортов [6–7]. В каждом из исследуемых дозиметров используются четыре кристалла  $\varnothing 0,5 \times 0,15$  см, два из которых  ${}^6\text{LiF}(\text{Mg}, \text{Ti})$ , а два –  ${}^7\text{LiF}(\text{Mg}, \text{Ti})$ , детектирующие гамма-нейтронное и гамма-излучение соответственно.

Для построения ЭЗЧ Harshaw 6776 и ДВГН-01 моделировалось облучение фантома плоскопараллельным пучком нейтронного излучения в диапазоне энергий от  $10^{-1}$  до  $10^{-12}$  ГэВ. Диапазон энергий включает в себя тепловые и быстрые нейтроны, чтобы проводимые исследования можно было соотносить с существующими условиями не только на реакторных, но и на ускорительных установках, используемых в атомной промышленности. Размер пучка 40 x 40 см был выбран для полного перекрытия фантома. Рассматривались направления пучка в горизонтальной плоскости под углами от 0 до  $180^\circ$  с интервалом в  $30^\circ$ , где положение  $0^\circ$  – направление пучка излучения по нормали к передней плоскости фантома, на которой расположен индивидуальный дозиметр. Так как диапазон углов от  $180$  до  $360^\circ$  является симметричным выбранному диапазону, то можно говорить о том, что диапазон углов падения излучения от 0 до  $180^\circ$  соответствует всей боковой геометрии исследуемого фантома. Энергетическая зависимость чувствительности рассчитывалась на основе среднего значения пяти смоделированных измерений, необходимых для снижения величины статистической ошибки. Знание угловой зависимости чувствительности индивидуальных дозиметров дает возможность определять значение эффективной дозы облучения за счет учета углового распределения плотности потока [8]. Представим, что фантом размещается в поле нейтронного излучения так, что на переднюю его плоскость падает преимущественное

количество излучения (рис 1.). Количество излучения, падающего со всех сторон, обозначим:  $ap - 0^\circ$ ,  $pa - 180^\circ$ ,  $l - (-90^\circ)$ ,  $r - (+90^\circ)$ . В сумме все количество излучения со всех сторон даст единицу:  $ap + pa + l + r = 1$ .

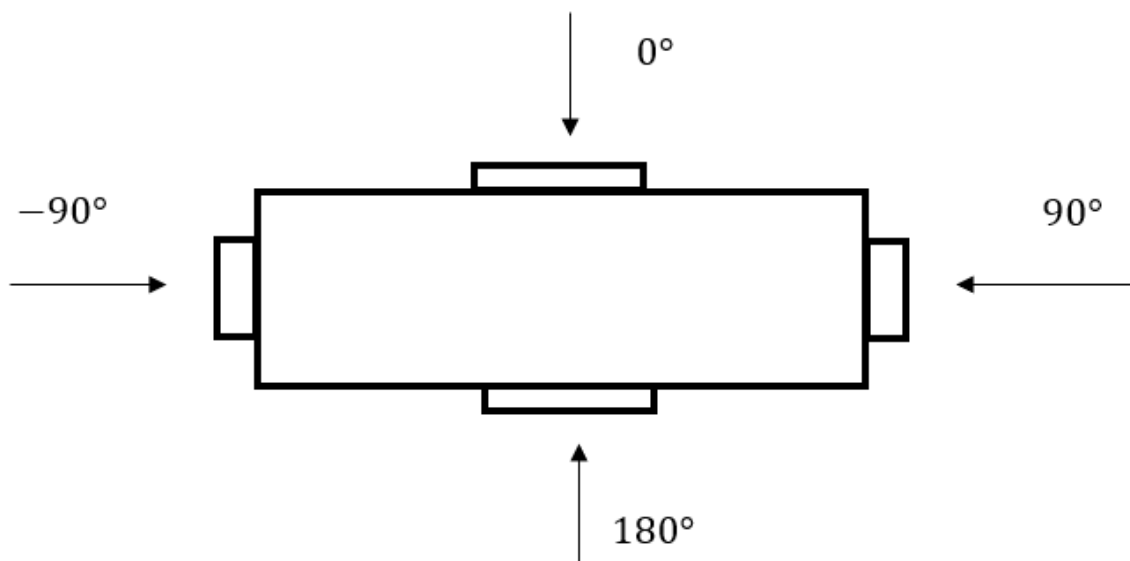


Рис. 1. Направления падающего излучения

Также необходима информация об энергетическом распределении плотности потока в данной точке. Такая информация может быть получена с помощью многосферного спектрометра. Тогда результаты измерения индивидуальной дозы с помощью дозиметра можно выразить:

$$\begin{cases} M(0^\circ) = [h_p(10, 0^\circ) \times ap + h_p(10, 90^\circ) \times (l + r) + h_p(10, 180^\circ) \times pa] \times \varphi; \\ M(-90^\circ) = [h_p(10, 0^\circ) \times l + h_p(10, 90^\circ) \times (ap + pa) + h_p(10, 180^\circ) \times r] \times \varphi; \\ M(180^\circ) = [h_p(10, 0^\circ) \times pa + h_p(10, 90^\circ) \times (l + r) + h_p(10, 180^\circ) \times ap] \times \varphi; \\ M(90^\circ) = [h_p(10, 0^\circ) \times r + h_p(10, 90^\circ) \times (ap + pa) + h_p(10, 180^\circ) \times l] \times \varphi, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\varphi$  – интегральная плотность потока

$$h_p(10, 0^\circ) = \int_{E_{min}}^{E_{max}} \frac{h_p(10, 0^\circ, E) S(E) dE}{\varphi}; \quad (2)$$

$$h_p(10, 90^\circ) = \int_{E_{min}}^{E_{max}} \frac{h_p(10, 90^\circ, E) S(E) dE}{\varphi}; \quad (3)$$

$$h_p(10, 180^\circ) = \int_{E_{min}}^{E_{max}} \frac{h_p(10, 180^\circ, E) S(E) dE}{\varphi}, \quad (4)$$

где  $S(E)$  – спектр нейтронного излучения;

$h_p(10, 0^\circ, E)$  – энергетическая зависимость чувствительности дозиметра при падении излучения под углом  $0^\circ$  на дозиметр;

$h_p(10, 90^\circ, E)$  – энергетическая зависимость чувствительности дозиметра при падении излучения под углом  $90^\circ$  на дозиметр;

$h_p(10, 180^\circ, E)$  – энергетическая зависимость чувствительности дозиметра при падении излучения под углом  $180^\circ$  на дозиметр.

Для нахождения коэффициентов  $ap$ ,  $pa$ ,  $l$ ,  $r$ , используемых в системе уравнений, были использованы экспериментальные данные измерений индивидуальным дозиметром Harshaw при облучении нейтронным излучением на 5-м блоке Нововоронежской АЭС [9]. Для нахождения значения энергетической зависимости

чувствительности плотность потока при определенной энергии падающего излучения умножалась на отклик дозиметра, полученный путем моделирования. Энергетическая зависимость чувствительности всего спектра была получена отношением сумм ЭЗЧ для каждой из различных энергий падающего излучения к плотности потока всего спектра излучений.

### 3. Результаты

Полученные результаты представляют собой четыре графика (рис. 2–5), на двух из которых представлены энергетические зависимости чувствительности для различных углов падения излучения, на двух других – угловые зависимости чувствительности для энергий различных величин для дозиметров Harshaw 6776 и ДВГН-01 соответственно.

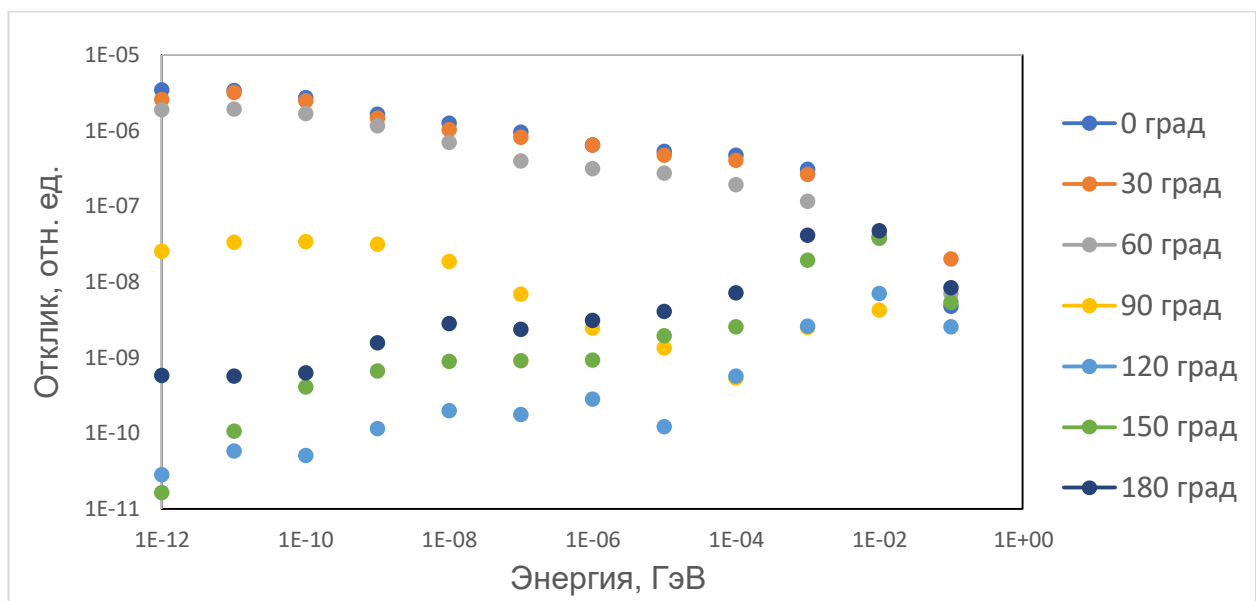


Рис. 2 Полученные энергетические зависимости чувствительности для дозиметра Harshaw 6776 для различных углов падения излучения

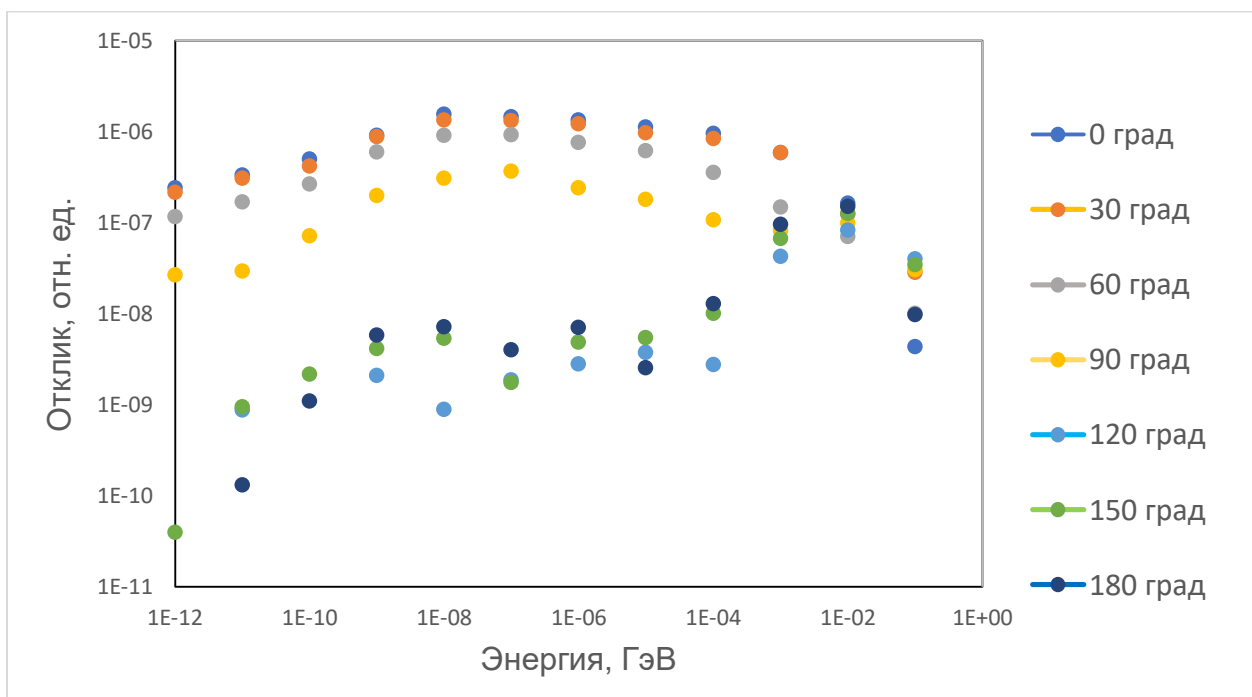


Рис. 3 Полученные энергетические зависимости чувствительности для дозиметра ДВГН-01 для различных углов падения излучения

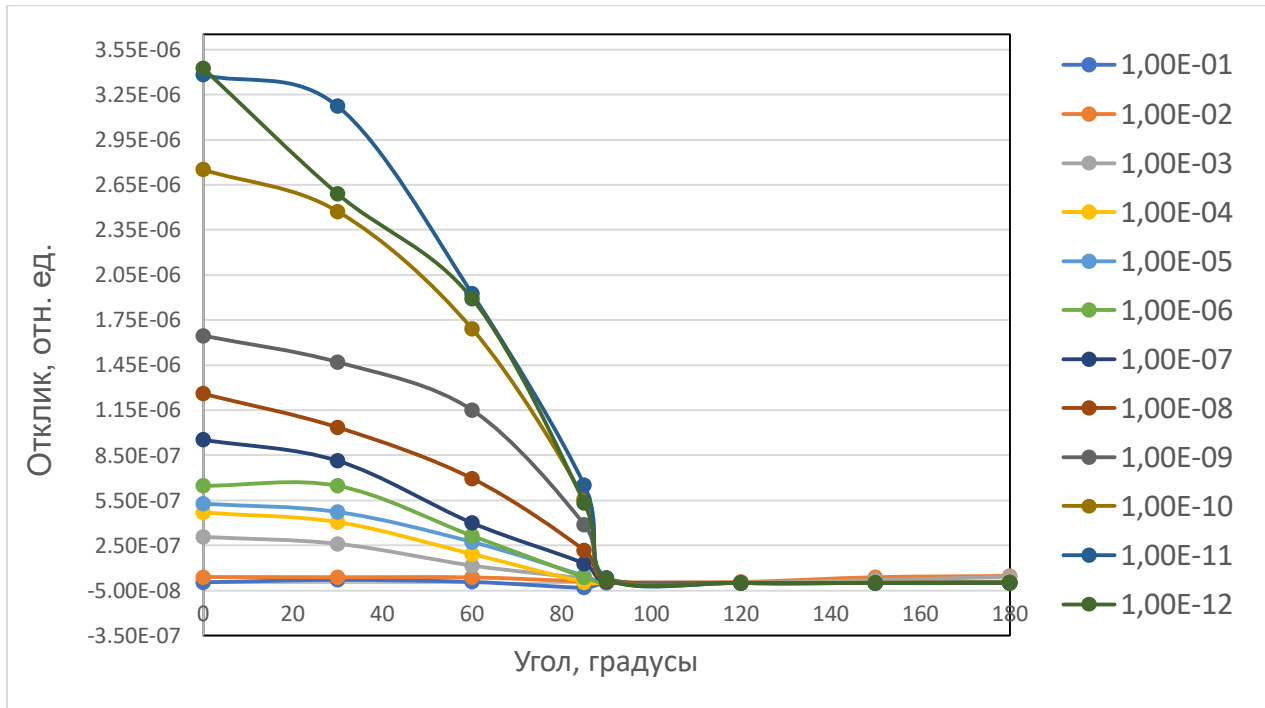


Рис. 4. Полученные угловые зависимости чувствительности для дозиметра Harshaw 6776 для различных величин энергий

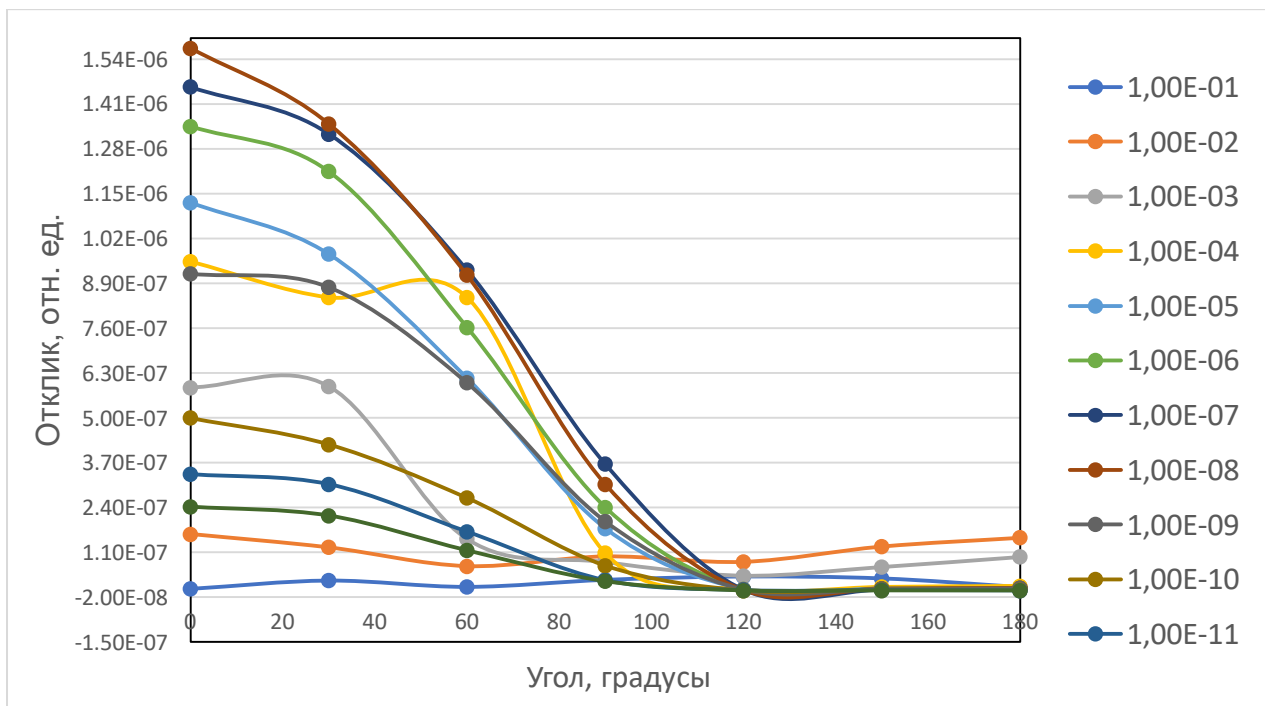


Рис. 5. Полученные угловые зависимости чувствительности для дозиметра ДВГН-01 для различных величин энергий

Получено, что для дозиметров при увеличении энергии падающего излучения на углах до 90 градусов отклик дозиметра падает, на углах от 90 градусов – возрастает.

Рассматривая угловые зависимости можно заметить, что отклик дозиметра падает, достигая минимального значения при 90 градусах для Harshaw 6776 и при 120 градусах для ДВГН-01.



Благодаря известным полученным дозам нейтронов при расположениях дозиметра в геометриях: ПЗ, ЗП, ПЛ, ЛП рассчитаны коэффициенты  $a_p$ ,  $a_r$ ,  $l$ ,  $g$  так, чтобы рассчитанная доза нейтронов соответствовала дозе нейтронов, полученных экспериментальным способом (табл. 1).

Таблица 1. Коэффициенты, рассчитанные для дозиметра Harshaw 6776

Коефф. Помещение	$a_p$	$a_r$	$l$	$g$
X-501	0,406328265	0,171149156	0,207016152	0,215506426
T-207	0,316310129	0,204082138	0,193042204	0,286565529
BC-435	0,436639969	0,181780173	0,148177050	0,233402808
529-1	0,520908026	0,089333750	0,197989900	0,191768324
533	0,506961045	0,094146648	0,099705784	0,299186523
414	0,286966232	0,139147644	0,232629468	0,341256656
A-502.4	0,216228056	0,298457755	0,323824114	0,161490075
A-601	0,258321325	0,242917041	0,218886449	0,279875186

Таким образом, найдены коэффициенты  $a_p$ ,  $a_r$ ,  $l$ ,  $g$  для дозиметра Harshaw 6776 (табл. 1), используемые в системе уравнений для расчета индивидуальной дозы облучения нейтронным излучением. Теперь для расчета индивидуальной дозы различных геометрий по данной методике, используя найденные коэффициенты, необходимо знать только плотность потока падающего нейтронного излучения.

По экспериментальным данным, полученным в ходе исследований на Нововоронежской АЭС [9], известны значения доз излучения для различных геометрий. Можно провести расчет доз по предложенной методике и сравнить полученные значения (табл. 2).

Таблица 2. Сравнение известных и рассчитанных по предложенной методике условно истинных значений доз для различных помещений

Помещение	Рассматриваемая геометрия	Условно истинное значение $E$ , мкЗв	Условно истинное значение $E$ , мкЗв, рассчитанное по предложенной методике
X-501	ПЗ	7,35	7,88
	ЗП	2,23	2,13
	ПЛ	1,42	1,41
	ЛП	1,46	1,35
	Суммарная полученная доза	12,47	12,77
T-207	ПЗ	4,00	3,24
	ЗП	1,10	1,30
	ПЛ	0,74	1,04
	ЛП	0,73	0,70
	Суммарная полученная доза	6,90	6,28
BC-435	ПЗ	129,00	138,53
	ЗП	38,43	38,85
	ПЛ	32,27	30,81
	ЛП	22,52	19,56
	Суммарная полученная доза	221,80	227,75

Окончание табл. 2

Помещение	Рассматриваемая геометрия	Условно истинное значение E, мкЗв	Условно истинное значение E, мкЗв, рассчитанное по предложенной методике
529-1	ПЗ	38,00	39,28
	ЗП	4,84	4,49
	ПЛ	6,59	5,91
	ЛП	5,72	6,11
	Суммарная полученная доза	55,20	55,80
533	ПЗ	37,00	28,75
	ЗП	2,15	3,57
	ПЛ	3,65	6,90
	ЛП	2,92	2,30
	Суммарная полученная доза	46,10	41,52
414	ПЗ	22,00	11,59
	ЗП	1,80	3,75
	ПЛ	3,11	5,67
	ЛП	3,25	3,86
	Суммарная полученная доза	30,40	24,87
А-502.4	ПЗ	38,00	32,45
	ЗП	4,84	30,69
	ПЛ	6,59	9,48
	ЛП	5,72	19,01
	Суммарная полученная доза	55,20	91,62
А-601	ПЗ	6,00	5,41
	ЗП	2,96	3,41
	ПЛ	2,38	2,15
	ЛП	1,54	1,68
	Суммарная полученная доза	12,70	12,65

На основании сходимости полученных расчетных и экспериментальных значений можно отметить, что предложенная методика оценки истинного значения эффективной дозы учитывает угловую зависимость чувствительности дозиметра и, соответственно, дозы нейтронов, получаемые в различных геометриях облучения.

#### 4. Выводы

1. Получены значения откликов дозиметров для различных углов падения излучения. Поведение ЭЗЧ дозиметра Harshaw 6776 на 90 градусах связано с тем, что диаметр кристалла дозиметра больше, чем его ширина ( $\emptyset 0,5 \times 0,15$  см), что способствует появлению погрешности измерений.

2. Получены угловые зависимости чувствительности для различных величин энергий излучения, падающего на дозиметры. Отклик дозиметра падает, достигая минимального значения при 90 градусах для Harshaw 6776 и при 120 градусах для ДВГН-01.

3. На основе данных об откликах дозиметров была предложена методика оценки истинного значения эффективной дозы. Ее особенность состоит в том, что используемые формулы учитывают вклад в дозу, полученную в различных геометриях облучения.
4. Различие в оцененной дозе по разным методикам объясняется разной оценкой углового распределения плотности потока нейтронного излучения.
5. Разная оценка углового распределения плотности потока обусловлена тем, что в старой методике предполагалось, что дозиметры детектируют излучение только при падении излучения перпендикулярно плоскости дозиметра. Новая методика учитывает угловую зависимость чувствительности дозиметра.
6. Оценка углового распределения плотности потока нейтронного излучения по старой методике может проводиться, когда спектр имеет большой вклад быстрых нейтронов.
7. Новая методика применима для любых полей, т. к. учитывает и энергетическую и угловую зависимости чувствительности.
8. Данную методику в дальнейшем можно развить до учета вклада многих углов боковой поверхности на основе полученных угловых зависимостей чувствительности исследуемых дозиметров.

## 5. Список литературы

1. Хлопцев, А. Ф. Лекции по радиационной безопасности : учебное пособие / А. Ф. Хлопцев. – Витебск : Изд-во Витебского гос. ун-та, 2005. – 149 с.
2. Дрейзин, В. Э. Подбор и оптимизация состава детекторов для многодетекторного спектрометра нейтронного излучения / В. Э. Дрейзин, Д. И. Логвинов, А. А. Гримов // АНРИ. – 2011. – Т. 65, № 2. – С. 16–24.
3. Veinot, K. G. Response of Harshaw neutron thermoluminescence dosimeters in terms of the revised ICRP/ICRU recommendations / K. G. Veinot, N. E. Hertel // Radiation Protection Dosimetry. – 2005. – Vol. 113, № 4. – P. 442–448.
4. The Fluka Code: Developments and Challenges for High Energy and Medical Applications / T. T. Bohlen, F. Cerutti, M. P. W. Chin [et al.] // Nuclear Data Sheets. – 2014. – Vol. 120. – P. 211–214.
5. Occupational radiation protection : general safety guide GSG-7 / IAEA. Vienna : International Atomic Energy Agency, 2018. – 335 p.
6. Hajek, M. A SOLUTION FOR NEUTRON PERSONAL DOSIMETRY IN THE ABSENCE OF WORKPLACE SPECTROMETRY / M. Hajek // Radiation Protection Dosimetry. – 2015. – P. 1–4.
7. Индивидуальный дозиметр смешанного излучения ДВГН-01: разработка и исследование характеристик / А. В. Санников, В. Н. Лебедев, В. Н. Кустарев [и др.] // АНРИ. – 2005. – № 3(42). – С. 50–59. – EDN HWICMX.
8. Пышкина, М. Д. Совершенствование системы индивидуального дозиметрического контроля нейтронного излучения на объектах использования атомной энергии : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 2.4.9 / М. Д. Пышкина ; [Место защиты: Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина]. – Екатеринбург, 2022. – 154 с. – Библиогр.: с. 132–145 (109 назв.).
9. Совершенствование системы дозиметрического контроля нейтронного облучения персонала Нововоронежской атомной станции / А. А. Екидин, В. П. Поваров, С. В. Росновский [и др.] // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2023. – № 1. – С. 82–95. – DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.1.07>.

**Сведения об авторах:**

**Спиридонова Ирина Сергеевна**, инженер-исследователь радиационной лаборатории Института промышленной экологии УрО РАН.

**Пышкина Мария Дмитриевна**, к. т. н., м. н. с. радиационной лаборатории Института промышленной экологии УрО РАН.

**Васильев Алексей Владимирович**, к. т. н., заведующий радиационной лабораторией Института промышленной экологии УрО РАН, Екатеринбург, Россия.

**Екидин Алексей Акимович**, к. ф.-м. н., доцент, ведущий научный сотрудник Института промышленной экологии УрО РАН, Екатеринбург, Россия.

## INFLUENCE OF THE ANGULAR AND ENERGY SENSITIVITY DEPENDENCES OF THE INDIVIDUAL DOSEMETERS FOR THE PERSONAL IRRADIATION ASSESSMENT

I. S. Spiridonova<sup>1,2</sup>, M. D. Pyshkina<sup>2</sup>, A. V. Vasylyev<sup>2</sup>, A. A. Ekinin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

<sup>2</sup> Institute of Industrial Ecology, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

*The energy and angular sensitivity dependences of the individual neutron dosimeters are investigated. The irradiation geometry study was carried out by modeling, reproducing the full picture of the interaction of the neutron field with the phantom. Due to information on the energy and angular sensitivity dependences, the most accurate estimates of the effective dose under the influence of neutron radiation can be obtained. The paper presents the results of calculating the energy and angular sensitivity dependences of individual neutron thermoluminescent dosimeters Harshaw 6776 and DVGN-01. Based on the data obtained on the individual dosimeters responses, a method for evaluating the accepted value of the effective dose was proposed.*

**Key words:** individual dosimeter; personal radiation monitoring; energy dependence of the sensitivity; angular dependence of the sensitivity; effective dose assessment methods.

### References

1. Hlopcev, A. F. Lekcii po radiacionnoj bezopasnosti : uchebnoe posobie / A. F. Hlopcev. – Vitebsk : Izd-vo Vitebskogo gos. un-ta, 2005. – 149 p. [In Russian].
2. Dreyzin, V. E. The selection and optimization composition of detectors for multidetector spectrometer of neutron radiation / V. E. Dreyzin, D. I. Logvinov, A. A. Grimov // ANRY. – 2011. – V. 65, № 2. – P. 16–24.
3. Veinot, K. G. Response of Harshaw neutron thermoluminescence dosimeters in terms of the revised ICRP/ICRU recommendations / K. G. Veinot, N. E. Hertel // Radiation Protection Dosimetry. – 2005. – Vol. 113, № 4. – P. 442–448.
4. The Fluka Code: Developments and Challenges for High Energy and Medical Applications / T. T. Bohlen, F. Cerutti, M. P. W. Chin [et al.] // Nuclear Data Sheets. – 2014. – Vol. 120. – P. 211–214.
5. Occupational radiation protection : general safety guide GSG-7 / IAEA. Vienna : International Atomic Energy Agency, 2018. – 335 p.
6. Hajek, M. A SOLUTION FOR NEUTRON PERSONAL DOSIMETRY IN THE ABSENCE OF WORKPLACE SPECTROMETRY / M. Hajek // Radiation Protection Dosimetry. – 2015. – P. 1–4.
7. DVGN-01 individual mixed radiation dosimeter: development and research of characteristics / A. V. Sanniikov, V. N. Lebedev, V. N. Kustarev [et al.] // ANRY. – 2005. – № 3(42). – P. 50–59. – EDN HWICMX.
8. Pyshkina, M. D. Sovershenstvovanie sistemy individual'nogo dozimetricheskogo kontrolya nejtronnogo izlucheniya na ob'ektah ispol'zovaniya atomnoj energii : dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk : 2.4.9 / M. D. Pyshkina ; [Mesto zashchity: Ural'skij federal'nyj universitet im. pervogo Prezidenta Rossii B. N. El'cina]. – Ekaterinburg, 2022...: p. 132–145 (109 назв.). [In Russian].
9. Improvement of the System of Dosimetric Control of Neutron Exposure of Staff of Novovoronezh Nuclear Power Plant / A. A. Ekinin, V. P. Povarov, S. V. Rosnocskiy [et al.] // Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika. – 2023. – № 1. – P. 82–95. – DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.1.07>.

## ИЗМЕНЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ РЕГИОНОВ ДОНБАССА ВСЛЕДСТВИЕ ВОЕННЫХ ДЕЙСТВИЙ

Г. Я. Дрозд, Е. И. Верех-Белоусова

ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет им. Владимира Даля»,  
г. Луганск, Россия

*В статье дан глубокий и подробный анализ экологических последствий военных действий, являющихся одним из основных источников нарушений в системе «человек – природа». Приведены результаты комплексного влияния всех составляющих антропогенных факторов боевых действий на атмосферу, ландшафт и почву в зоне проведения специальной военной операции в Донбассе. Оценен масштаб и последствия для экологии региона каждого из факторов. Установлены и изучены основные факторы: взрывы, пожары, перемещение земляных масс, загрязнение и захламление почв территории. Полученные данные уникальны, их достоверность подтверждается результатами немногочисленных исследований. Приведенные результаты требуют соответствующего осмысления и реагирования для возобновления и обеспечения нормальной жизнедеятельности на территориях.*

**Ключевые слова:** экология; загрязнение атмосферы; физическая деградация почвы; экологическая опасность.

### 1. Введение

Любая война в истории человечества – это экологическая катастрофа. Военные действия в Донбассе оказывают комплексное негативное воздействие на окружающую природную среду региона. Боевые действия в Донбассе длятся 10 лет, а самая активная ее фаза – специальная военная операция (СВО) – почти два года. Проводимые военные действия на территории Луганской Народной Республики предоставляют возможность изучать и наблюдать изменения природных сред на реальных фактах, находясь внутри событий. Вопрос комплексного исследования негативного воздействия боевых действий на окружающую среду Донбасса не изучен, и поэтому возникает актуальная проблема оценки деградации природных сред в результате проведения боевых действий.

*Цель работы* – оценить влияние военных действий на качество окружающей среды Донбасса и выполнить прогноз последствий от ее деградации.

### 2. Материалы и методы

Исходные данные получены из открытых источников в СМИ и оперативных сводок компетентных ведомств на официальных сайтах. В полевых исследованиях использовалась фотофиксация объектов, измерения объектов и отдельных элементов проводили с помощью металлических измерительных лент. Ряд оценок получен расчетным путем с использованием справочных материалов.

Объектами исследования стали места активных боевых действий двух освобожденных населенных пунктов Луганской Народной Республики: г. Кременная, г. Попасная. Исследовались непосредственно воронки от взрывов и состояние почвенного профиля.

### 3. Результаты

На момент подготовки статьи продолжительность специальной военной операции составляла 700 дней. Зона проведения СВО охватывает примерно 65 % территории новых регионов России (приблизительно 83 000 км<sup>2</sup> из 127 тыс. км<sup>2</sup>).

Общая численность противоборствующих войск на этой территории оценивается минимум в 600 000 человек. По информации из компетентных источников [1], за время конфликта использовано около 27 млн снарядов (примерно 1,5 млн т) и около 400 млн патронов (примерно 2 500 т). Исходя из того, что масса взрывчатых веществ составляет 10–20 % от массы боеприпаса, то общее количество использованной взрывчатки оценим в 300 тыс. т, что эквивалентно по мощности 25 ядерным бомбам (по 12 кт), сброшенных на Хиросиму.

По данным МО РФ, «всего с начала проведения специальной военной операции уничтожено: 564 самолета, 263 вертолета, 10 272 БПЛА, 445 ЗРК, 14 412 танков и других боевых бронемашин, 1 194 боевые машины РСЗО, 7 578 орудий полевой артиллерии и минометов, а также 16 905 единиц спецтехники» [1].

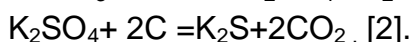
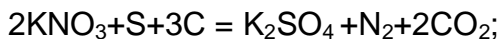
При эксплуатации указанной техники использовано более 12 млн т топлива в виде дизельного, бензина и керосина. На территориях ДНР и ЛНР вражескими вооруженными силами уничтожено и сожжено несколько хранилищ топлива суммарным объемом 250 тыс. т. Все эти средства ведения боевых действий стали источником загрязнения воздушного бассейна.

Зафиксированные цифры использованы для оценки вредных выбросов в окружающую среду от данного количества техники в течение проведения операции.

Приведенные данные о средствах ведения боевых действий являются крайне приблизительными, т. к. учесть все практически невозможно. Однако они позволяют сформулировать и оценить потенциальную угрозу окружающей природной среде не с точки зрения погубленных жизней и разрушений, а с позиций изменения качества ее отдельных компонентов. Рассмотрим их подробнее.

*Атмосфера.* Взрывчатые вещества рассеиваются при использовании их в бою. Образующиеся в момент взрыва заряда газообразные продукты находятся под давлением 200–250 тыс. атмосфер и нагреты до температуры 3 500–4 000 °С [2]. Рассмотрим виды и количество образующихся газов.

В военной сфере широко используется не более 2–3 десятков видов различных взрывчатых веществ. Так называемый дымный порох (75 %  $\text{KNO}_3$ ; 10 % S и 15 % C) приблизительно соответствует составу  $2\text{KNO}_3 + 3\text{C} + \text{S}$ , и его сгорание происходит в две стадии:



В результате реакции выделяется гораздо более сложный спектр продуктов сгорания, как правило, на 40 % состоящий из газообразных и на 60 % – из твердых производных продуктов реакции в виде выделения дыма (рис. 1).



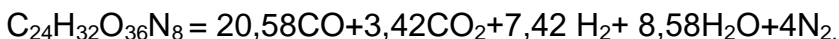
Рис.1. Визуальный факел взрыва

Дымный порох в основном используется в дополнительных минных метательных зарядах.

Взрывчатое вещество подавляющего количества боеприпасов представлено рядом артиллерийских бездымных порохов на основе тринитротолуола, нитроглицерина, гексогена, пироксилина и их комбинаций. Согласно справочным источникам [2], при взрыве аммотола происходит реакция:



Процесс взрыва пироксилина (восьмиазотной нитроклетчатки) описывается реакцией [2]:



Представляет интерес определить количество пороховых газов. Вот как специалисты отвечают на этот вопрос [2]: «Главная особенность порохового цикла – превращение высокоплотной фазы твердых компонентов заряда в низкоплотную фазу рабочих газов. Это – результат необратимых окислительно-восстановительных реакций “горючее + окислитель = продукты-газы”. Масса продуктов-газов равна массе пороха, поэтому объем пороховых газов будет превышать объем пороха пропорционально отношению плотностей исходного заряда и газовой фазы» [2].

Вычислим объем газообразных продуктов взрыва 1 кг тротила  $\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_3\text{CH}_3$ . Уравнение его взрывчатого разложения:



Как следует из вышеизложенного, основными загрязнителями атмосферы являются газообразные компоненты  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$  и твердые продукты в виде сажи и некоторых солей.

Объем газообразных продуктов:

$$V_{\text{газ}} = \frac{22,4(2,5+3,5+1,5)}{1 \times 227} = 0,740 \text{ м}^3. \quad (1)$$

Объем монооксида углерода, или угарного газа ( $\text{CO}$ ):

$$V_{\text{CO}} = \frac{22,4(3,5)}{1 \times 227} = 0,345 \text{ м}^3. \quad (2)$$

Исходя из имеющихся данных, при взрыве 300 тыс. т взрывчатых веществ образуется 103 млн 500 тыс.  $\text{м}^3$  чистого угарного газа ( $\text{CO}$ ) (118 тыс. т). Так как ПДК для отдельных компонентов, таких как  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ , находится на уровне 0,04–6  $\text{мг}/\text{м}^3$ , то необходимо «разбавление» еще на 6 порядков. Отсюда следует, что взрыв 300 тыс. т пороха образует условное газовое облако объемом 103 500  $\text{км}^3$  с концентрацией загрязнений внутри облака больше ПДК. Это подтверждается исследованиями экспертов организации «Экология–Право–Человек», которые ранее автором приводились [3] (рис. 2).



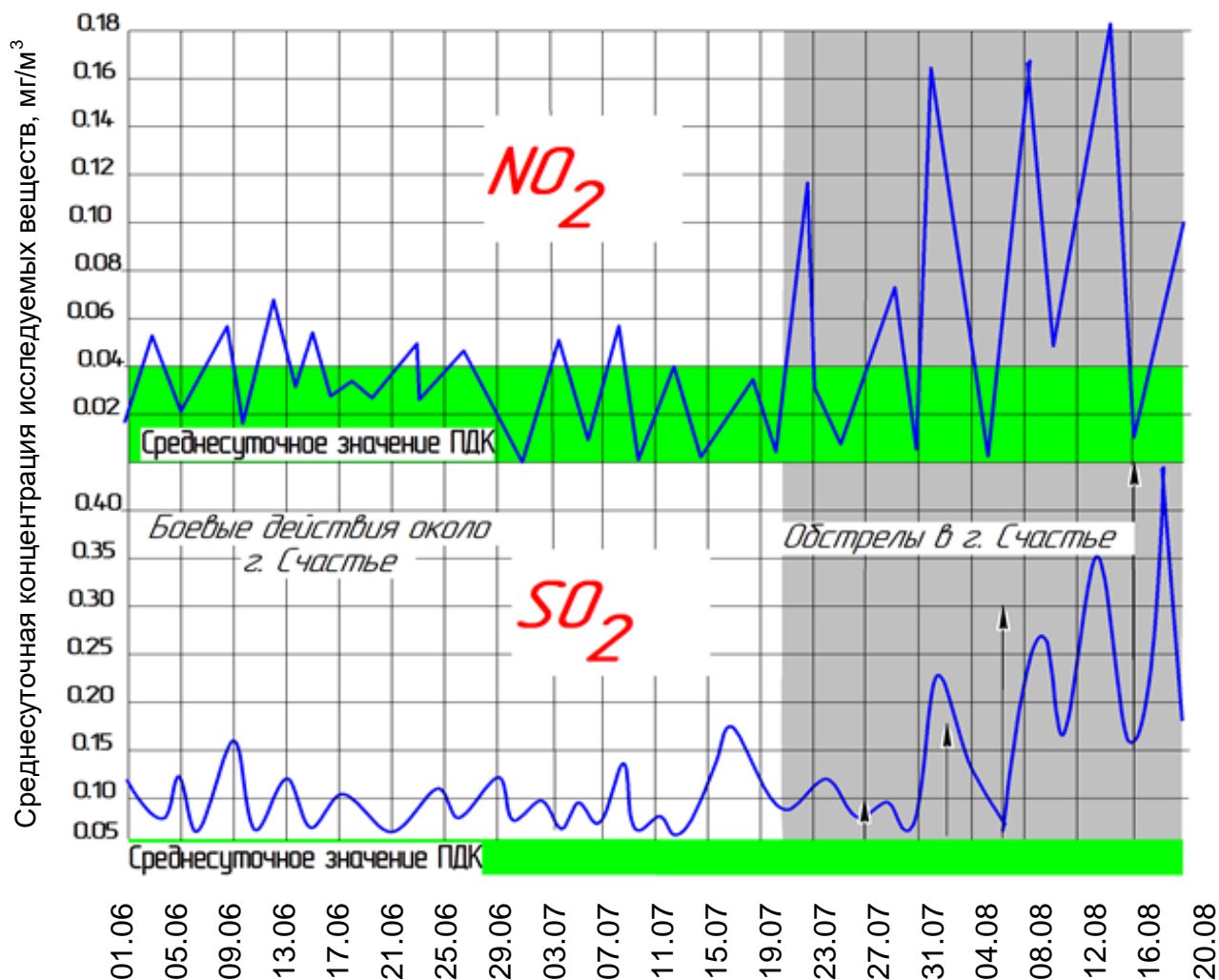


Рис. 2. Концентрация продуктов сгорания взрывчатых веществ в воздухе при обстреле г. Счастье в 2014 г. [3]

Исследованиями установлено, что показатели содержания в воздухе отдельных веществ существенно превысили допустимые нормы концентрации. Исследование выполнено с использованием данных Автоматизированной системы мониторинга окружающей среды Луганской области. Во время обстрелов вооруженными силами Украины (далее – ВСУ) г. Счастье с третьей декады июля по третью декаду августа 2014 г. в воздухе значительно увеличилась концентрация оксидов серы, азота и углерода. При этом количество оксидов серы и азота значительно превысило пределы допустимой концентрации: 13 августа – в 5 раз, а 14 августа – в 8 раз. Превышение концентрации в воздухе оксидов серы, углерода и азота является угрозой для здоровья населения и зеленых насаждений.

Атмосфера интенсивно загрязняется и выхлопными газами военной тяжелой техники и авиации, а также продуктами горения бензина и солярки разрушенных и горящих хранилищ топлива (рис. 3).



Рис. 3. Горящая нефтебаза в Луганске после обстрела ВСУ

Как было отмечено выше, военной техникой было использовано порядка 12 млн т топлива + выгорели емкости с 250 тыс. т топлива. Всего 12,25 млн т.

Для расчетов принят бензин. По данным Министерства энергетики РФ, при сжигании 1 л бензина образуется 2,35 кг  $\text{CO}_2$ .

Таким образом, при сжигании всего топлива образуется:  $12,25 \text{ млн т} \times 2,35 = 28,79 \text{ млн т } \text{CO}_2$ . Объем газа при нормальных условиях при плотности  $\rho = 1,98 \text{ кг/м}^3$  составит 56,9 млрд  $\text{м}^3$ , но при приведении к значениям размерностей по ПДК, получим размер гипотетического облака углекислого газа объемом 600 тыс.  $\text{км}^3$ . Наряду с углекислым газом при сгорании топлива выделяется большое количество сажи (С), оксида углерода (СО), оксидов азота ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_x$ ), углеводородов ( $\text{C}_n\text{H}_m$ ).

Суммарная масса загрязнений атмосферы продуктами взрывов взрывчатых веществ (далее – ВВ) и продуктами горения топлива за время военных действий составила 29,9 млн т. Сравним полученное значение «военных» загрязнений с загрязнениями, произведенными эталонным промышленным предприятием.

За 2012 г. наибольшее количество выбросов в атмосферный воздух Луганской области осуществил ПАО «Алчевский металлургический комбинат» – 83 тыс. т. (19 % от общих выбросов по области за указанный год), таким образом, 700 дней боевых действий в Донбассе по загрязнению атмосферы эквивалентны 361 году бесперывной работы крупнейшего промышленного предприятия Луганщины.

**Почва, грунты.** Оценим влияние основных негативных факторов военных действий на территорию, ландшафт и почву.

**Артиллерийские воронки от взрывов.** По данным представительства ДНР в СЦКК [1], ежедневный расход снарядов российскими подразделениями в ходе спецоперации составляет от 10 до 50 тыс. единиц. В год это число составляет приблизительно 11 млн снарядов, у ВСУ ежесуточный расход – 6–7 тыс. снарядов (примерно до 200 тыс. в месяц, т. е. суммарно около 2,4 млн/год). Таким образом, за два года обеими сторонами использовано 26,8 млн единиц артиллерийских боеприпасов. Кроме того, в боевых действиях используется большое количество ракет, реактивных взрывных устройств и менее мощных боеприпасов.

Остановимся на снарядах. С обеих сторон используется широкий спектр калибров боеприпасов, но наиболее часто употребляемые калибры 100, 120, 122, 125, 152, 155, 203 мм. Характеристика некоторых боеприпасов и вызываемое ими взрывное действие приведено в табл. 1 и рис. 4 и 5. Размеры воронок зависят от массы боеприпаса и взрывчатого вещества.

Таблица 1. Характеристика артиллерийских снарядов [2]

Калибр снаряда	Масса снаряда, кг	Масса взрывчатого вещества, кг	Размер воронки	
			D, м	H, м
122	25	3,32	3–4	1–1,5
152	45	7,5	4–5	1,5–1,8
203	102	16	5–7	2–3,5



а

б

в

Рис 4. Воронки от боеприпасов:

а) от снаряда калибром 155 мм; б) от мин 82 мм; в) от мины 120 мм

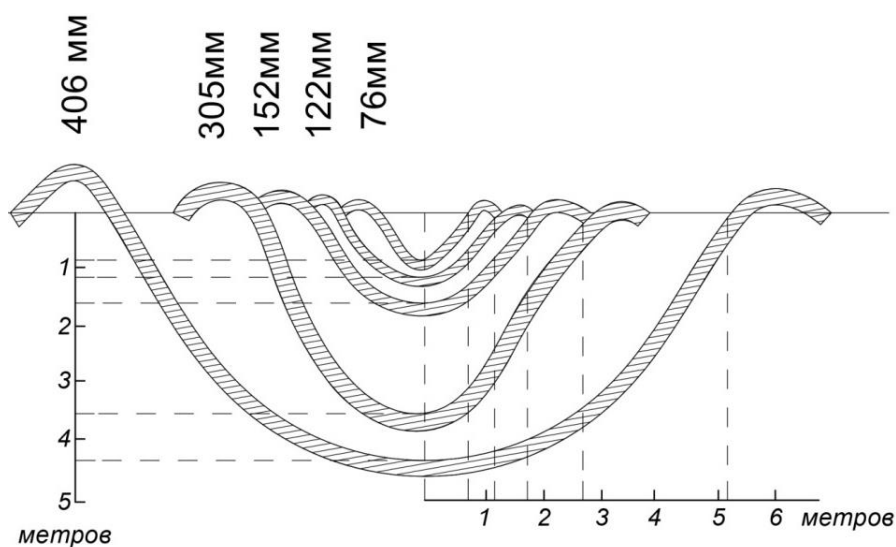


Рис. 5. Номограмма зависимости размеров взрывной воронки (радиус и глубина) от калибра боеприпаса [2]

Размеры воронки на рис. 4 а составляют: диаметр – 4,5 м, глубина – 2,2 м, диаметр по внешнему валу выброшенного грунта равен примерно 15 м. Определим объем выброшенного грунта снарядом калибра 155 мм как объем конуса высотой 2,2 м и диаметром основания 4,5 м:

$$V = \frac{1}{3} \cdot h \cdot \frac{\pi d^2}{4} = 11,7 \text{ м}^3.$$

Тогда суммарный объем грунта, выброшенного 26 млн 800 тыс. взрывами, составит примерно 313,5 млн м<sup>3</sup>.

Площадь нарушенной территории диаметром 15 м (сама воронка и кольцевой слой грунта вокруг нее составит):

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = 176 \text{ м}^2.$$

Суммарная площадь территории от воронок и земляных выбросов составит 4716 км<sup>2</sup>.

Плотность артиллерийского обстрела характеризует рис. 6.



Рис. 6. Плотность артиллерийского обстрела лесополос под г. Бахмутом (Артемовск). Вид с квадрокоптера

Кроме механического перемещения грунта вследствие взрыва в горизонтальном и вертикальном направлениях происходит и активное его загрязнение металлическими включениями – осколками от боеприпасов. По результатам ранее проведенных нами исследований, средняя концентрация осколков на 1 м<sup>2</sup> почвы достигает 170–200 г/м<sup>2</sup> (рис. 7) [3].



Рис. 7. Осколки снарядов

Масса металлических осколков на территории СВО составляет не менее 0,2 кг/м<sup>2</sup> × 4716 км<sup>2</sup> = 943 т, что координирует с массой использованных боеприпасов – 1,5 млн т.

Образующиеся при взрыве заряда газообразные продукты находятся под давлением 20–25 ГПа (200–250 тыс. атмосфер), нагреты до температуры порядка 3 500–4 000°С и занимают объем, равный объему заряда взрывчатых веществ [2]. Это приводит к частичному выгоранию гумуса и образованию спекшихся частиц грунта (рис.8).



Рис. 8. Оплавленные неорганические гранулы грунта фракцией 1–2 мм

Поверхность земли на локальных участках усеяна стреляными гильзами и остатками боеприпасов (рис. 9).



Рис. 9 Поверхностное загрязнение почвы остатками боеприпасов

**Фортификационные сооружения.** Кроме взрывного воздействия боеприпасов, на преобразование ландшафта и деградацию почвы оказывают влияние земляные фортификационные работы и заградительные сооружения.

Оценим их объем и вклад в деградацию почв в районе военных действий. Согласно Уставу сухопутных войск [4] территория опорного пункта мотострелкового взвода (30–35 человек) достигает 12 га (рис.10).

В зоне СВО с обеих сторон находятся примерно 600 тыс. человек, или приблизительно 20 000 взводов. Тогда суммарная территория укрепрайонов составит 240 тыс. га, или 2 400 км<sup>2</sup>.

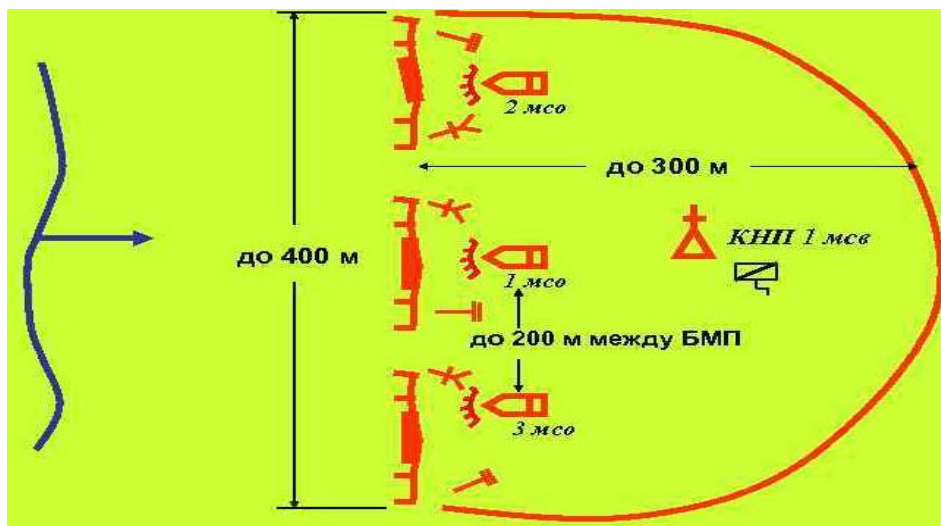


Рис.10. Тактические нормы для взвода

По данным официальных военных источников [5, 6], протяженность окопов российских войск достигает 2 000 км, ориентировочно протяженность украинских укреплений такая же. Профиль окопа имеет размеры  $1 \times 1,5-1,8$  м. Объем земляных работ при отрывке окопов составит 6 млн  $\text{м}^3$ . Прибавим сюда земляные работы по обустройству взводных опорных пунктов [6] – 6 млн  $\text{м}^3$ . Суммарный объем земляных работ при создании этого вида сооружений 12 млн  $\text{м}^3$ . Полоса территории, изымаемой под окопы с насыпанным бруствером, составляет примерно 10 м, тогда суммарная площадь под земляными сооружениями достигает минимум 60  $\text{км}^2$  (рис. 11).

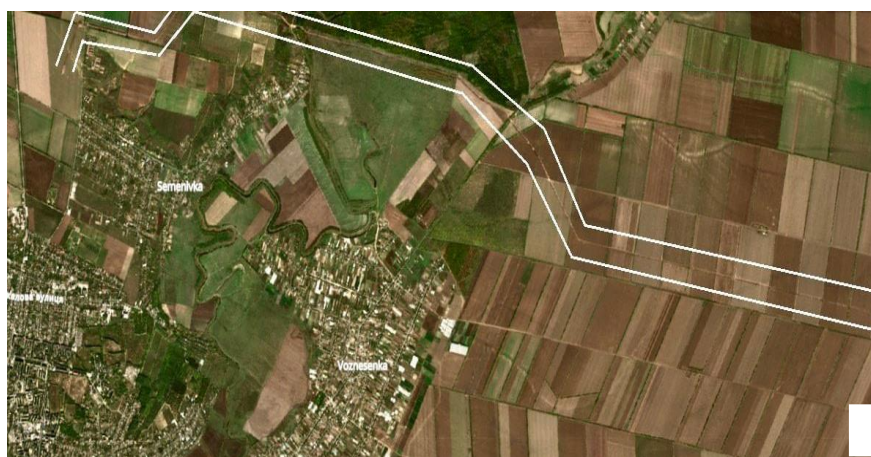


Рис.11. Окопы:

- а) строительство российских окопов; б) окопы ВСУ в лесополосах;  
в) мегаокоп длиной 70 км (вид со спутника)

**Блиндажи и инженерные заграждения.** Блиндаж – это постоянное или временное подземное фортификационное сооружение для защиты от пулеметного, артиллерийского и минометного огня (рис. 12 а). Инженерные заграждения предназначены для препятствия и затруднения маневров военной техники (рис. 12 б). Блиндажи устраиваются из расчета минимум один на отделение (10 человек), и на его сооружение по нормам [6] необходимо  $10,3 \text{ м}^3$  строительного материала, как правило, древесины. В зоне боевых действий находится не менее 60 тыс. таких объектов, в составе которых заключено более 600 тыс.  $\text{м}^3$  строительных материалов.



Рис.12. Фортификационные сооружения:  
а) блиндаж; б) заграждение типа «зуб дракона»

В зоне СВО используются преимущественно два типа инженерных заграждений: так называемые «зубы дракона» и минные поля [6]. Первый тип представляет собой бетонные пирамиды высотой 90 или 120 см, устанавливаемые в несколько рядов в шахматном порядке на расстоянии 2–3 м друг от друга.

Второй тип заграждений – минные поля (рис. 13).



Рис.13. Минные поля

Они представляют собой скрытно или открыто установленные в большом количестве противопехотные или противотанковые мины. По оценке военных экспертов, около 30 % территории Украины заминировано [7]. После начала боевых действий на Украине 250 тыс.  $\text{км}^2$  территории покрыто минными полями, на полное разминирование которых потребуются десятки лет, а некоторые источники указывают, что для полного разминирования такой территории уйдет более сотни лет [8].

Площадь минных полей превышает территорию СВО, т. к. основная их часть установлена Украиной вдоль границ с сопредельными государствами.

*Сожженная и поврежденная техника.* Согласно последним статистическим данным Министерства обороны РФ всего с начала проведения специальной военной операции уничтожено 536 самолетов, 254 вертолета, 9009 БПЛА, 441 ЗРК, 13 500 танков и других боевых бронемашин, 1 185 боевых машин РСЗО, 7 128 орудий полевой артиллерии и минометов, а также 15 369 единиц спецтехники.

При поражении техники происходит ее возгорание, утечка топлива, возможный взрыв и разрушение (рис. 14).



Рис. 14. Горящая поврежденная техника

Примем площадь пожара от единицы техники – 100 м<sup>2</sup>, тогда суммарная площадь очагов горения составит минимально 5 км<sup>2</sup> с загрязнением и деструкцией поверхностного слоя почвы.

На момент подготовки статьи в ДНР и ЛНР освобождено 242 населенных пункта площадью от одного до сотен квадратных километров.

По нашим грубым оценкам, суммарная площадь освобожденной городской застройки составляет более 1 000 км<sup>2</sup> с характерными разрушениями, приведенными на рис. 15. Многие объекты восстановлению не подлежат. Масса строительного мусора исчисляется миллионами тонн (разрушено и повреждено до 100 тыс. объектов), а плотность такого техногенного загрязнения превышает 1 000 т/км<sup>2</sup> [3].







Рис. 15. Состояние разрушенных городов

По данным [3], в зону боевых действий попало более 2 700 км<sup>2</sup> лесов и при этом не менее их трети (900 км<sup>2</sup>) пострадали от вырубки, пожаров, боевых действий и уничтожения (рис. 16).



Рис. 16. Состояние лесов в зоне боевых действий (под г. Кременная)

Резюмируя вышеизложенное и опираясь на опыт СВО, представляется возможным выполнить комплексный анализ факторов негативного воздействия на окружающую среду в результате ведения длительных боевых действий и их последствий (табл. 2).

Таблица 2. Анализ факторов негативного воздействия на окружающую среду

Фактор воздействия	Последствия
Взрыв боеприпасов	Количество воронок более 26,8 млн штук с выбросом грунта объемом более 313,5 млн м <sup>3</sup> . Суммарная площадь пораженной взрывами территории более 4 716 км <sup>2</sup>
Фортификационные сооружения	Количество вынутаго грунта составляет более 12 млн м <sup>3</sup> . Площадь земли, выделенная под опорные пункты и фортификационные сооружения, составляет около 2 460 км <sup>2</sup>
Инженерные заграждения	Заграждение «зуб дракона» занимает территорию не менее 5 км <sup>2</sup> . Минные поля занимают территорию 70 000 км <sup>2</sup> (практически вся зона СВО)

Окончание табл. 2

Фактор воздействия	Последствия
Поврежденная техника	Территория очагов горения или корродирующей поврежденной техники составляет 3 км <sup>3</sup>
Сгоревшие, вырубленные и уничтоженные лесонасаждения	Площадь территории составляет 900 км <sup>2</sup>
Захламление территории разрушенными промышленными и гражданскими объектами	Площадь территории более 1000 км <sup>2</sup> . Объем строительного мусора составляет миллионы тонн
Загрязнение почвы металлическими включениями – осколками боеприпасов	Плотность загрязнения – 0,2 кг/м <sup>2</sup> или более 943 000 т металла
Мины, минные поля	До 80 % территории зоны СВО

#### 4. Выводы.

Проведенный детальный анализ и составленная на основе его комплексная количественная оценка деградации окружающей среды вследствие военных действий в Донбассе позволяет сделать следующие выводы:

1. Длительные боевые действия – важнейший антропогенный фактор в изменении экологии региона Донбасса, влияющий абсолютно на все сферы окружающей природной среды, а потенциал фактора в виде средств ведения этих действий можно охарактеризовать мощностью использованного оружия: 1,5 млн т снарядов (300 тыс. т взрывчатых веществ), что эквивалентно 25 ядерным бомбам, сброшенных на Хиросиму.
2. Масса газообразных веществ, загрязняющих атмосферу вследствие взрывов боеприпасов, сгорания топлива и пожаров, превышает 30 млн т, а объем гипотетического облака с концентрацией CO, CO<sub>2</sub>, превышающих ПДК, составляет не менее 600 тыс. км<sup>3</sup>.
3. Физико-механическую деструкцию почвы вследствие боевых действий можно рассматривать как последствия антропогенного фактора от различных видов воздействия.
4. Перемещение и перемешивание огромных масс почвы, загрязнение и захламление территории вызывает изменение ее биогеохимического баланса, что безусловно негативно отразится на ее продуктивности.

#### 5. Список литературы

1. В настоящее время ежедневный расход снарядов в СВО/Представительство ДНР в СЦКК. 2023. – URL: <http://www.dnr-sckk.ru> (дата обращения: 19.09.2023).
2. Андреев К. К. Теория взрывчатых веществ. / К. К. Андреев, А. Ф. Беляев. – М: Оборонгиз, 1960. – 595 с.
3. Дрозд, Г. Я. Оценка деградации качества окружающей среды Донбасса вследствие годовых боевых действий / Г. Я. Дрозд // Агротехника и энергообеспечение. – №2 (39). – 2023. – С. 90–100. – ISSN: 2410-5031.
4. Боевой устав сухопутных войск. – М.: МО РФ, 2013. – 801 с.
5. Названа длина возведенных в ходе СВО российскими военными оборонительных сооружений. 2023. – URL: <https://lenta.ru/news/2023/01/20/rubezhi/> (дата обращения: 20.01.2023)
6. Полевые сооружения и заграждения для войсковых позиций: краткий справочник / под ред. А.С. Леменовского. – М.: Военное изд-во Министерства Обороны Союза ССР, 1956. – 159 с.
7. Украину признали самой заминированной страной в Мире. 2023. – URL: <https://lenta.ru/news/2023/01/29/miny/> (дата обращения: 22.09.2023).

8. Названы сроки разминирования территории Украины.  
URL:<https://lenta.ru/news/2023/07/22/ukr/> (дата обращения: 22.09.2023).

**Сведения об авторах:**

**Дрозд Геннадий Яковлевич**, д. т. н., профессор кафедры промышленного, гражданского строительства и архитектуры ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», ЛНР, Россия. Эл. почта: [drozd.gya@mail.ru](mailto:drozd.gya@mail.ru)

**Верех-Белоусова Екатерина Иосифовна**, к. т. наук, доцент кафедры химии и инновационных химических технологий ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», ЛНР, Россия. Эл. почта: [kate3152@yandex.ru](mailto:kate3152@yandex.ru)

## CHANGES THE ENVIRONMENTAL SITUATION OF DONBASS REGIONS DUE TO MILITARY ACTIONS

G.Ya. Drozd, E.I. Verekh-Belousova

*Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Lugansk, LPR, Russia*

*The article provides a deep and detailed analysis of the environmental consequences of military operations, which are one of the main sources of violation in the "man–nature" system. The results of the complex influence of all components of anthropogenic factors of hostilities on the atmosphere, landscape and soil in the zone of a special military operation in Donbass are presented. The scale and consequences for the ecology of the region of each of the factors are estimated. The main factors have been identified and studied: explosions, fires, displacement of earth masses, pollution and cluttering of the soil of the territory. The data obtained are unique, their reliability is confirmed by the results of a few researchers. The analysis of data of physical and mechanical destruction of soil because of battle actions is presented as a complex anthropogenic factor, characterized the types of influence and their consequences. Findings and results are reliable, unique and require the proper comprehension and reacting for renewal and ensure normal life in the territories.*

**Keywords:** ecology; contamination of atmosphere; physical degradation of soil; ecological danger.

### References

1. V nastojashhee vremja ezhednevnyj rashod snarjadov v SVO / Predstavitel'stvo DNR v SCKK. 2023. URL: <http://www.dnr-sckk.ru> (data obrashhenija: 19.09.2023)
2. Andreev, K. K. Teorija vzryvchatyh veshhestv. / K. K. Andreev, A. F. Beljaev. – M.: Gosudarstvennoe nauchno-tehnicheskoe izd-vo OBORONGIZ, 1960. – 595 s.
3. Drozd, G.Ja. Ocenka degradacii kachestva okruzhajushhej sredy Donbassa vsledstvie godovyh boevyh dejstvij / G. Ja. Drozd // Agrotehnika i jenergoobespechenie. – №2 (39). – 2023. – S. 90–100. (Vam nado svoj vstavit' DOI 10.25791/esip.09.2020.1176. – EDN ASHHV)
4. Boevoj ustav suhoputnyh vojsk. – Moskva: MO RF, 2013. – 801 s.
5. Nazvana dlina vozvedennyh v hode SVO rossijskimi voennymi oboronitel'nyh sooruzhenij. – 2023. – URL:<https://lenta.ru/news/2023/01/20/rubezhi/>(data obrashhenija: 20.01.2023)
6. Polevye sooruzhenija i zagrazhdenija dlja vojskovykh pozicij: kratkij spravocnik / pod red. A. S. Lemenovskogo. – M.: Voennoe izd-vo Ministerstva Oborony Sojuza SSR, 1956. – 159 s.
7. Ukrainu priznali samoj zaminirovannoj stranoj v Mire. 2023. – URL:<https://lenta.ru/news/2023/01/29/miny/>(data obrashhenija: 22.09.2023)
8. Nazvany sroki razminirovanija territorii Ukrainy. URL:<https://lenta.ru/news/2023/07/22/ukr/> (data obrashhenija: 22.09.2023)

## КРАТКИЙ АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ДЕЛ С УБОРКОЙ СНЕГА В КРУПНОМ РОССИЙСКОМ ГОРОДЕ НА ПРИМЕРЕ Г. ЕКАТЕРИНБУРГА

А. В. Шевченко, Г. П. Малиновский, А. А. Селезнев, И. В. Ярмошенко

*Институт промышленной экологии УрО РАН, Екатеринбург, Россия*

*В настоящей работе проанализированы многолетние данные (2013–2023 гг.) о накоплении и уборке снега с территорий улично-дорожной сети и внутридворовых пространств в г. Екатеринбурге. По результатам исследования в среднем за 10 лет накопление снега к началу снеготаяния оценивается в 106 кг/м<sup>2</sup>. На городские дороги, тротуары в среднем выпадает около 2,1 млн т снега, на придорожные газоны – 1,8 млн т, на придомовые территории – 1,6 млн т (из них на проезды и тротуары приходится 0,67 млн т). С городских дорог и тротуаров на снегоприемные пункты вывозится около 57 % выпавшего снега, оставшаяся часть, предположительно, остается на придорожных газонах, обочинах и других участках улично-дорожной сети (УДС). Увеличение объемов уборки снега в два раза существенно повысит продолжительность периода нормального функционирования городской инфраструктуры. Для получения полноценной оценки современного состояния содержания всех территорий города в зимний период необходимо дополнительно проанализировать данные о содержании территорий, которые не обслуживаются муниципальными предприятиями.*

**Ключевые слова:** город; снегопад; уборка снега; накопление снега; благоустройство; содержание территорий.

### 1. Введение

Для большей части территории России характерно образование устойчивого снежного покрова в зимний период. Характеристики снежного покрова, продолжительность его нахождения на поверхности зависят от климатических условий, рельефа и типа использования территории [1–3].

В крупных городах России, расположенных в умеренно-континентальной и континентальной климатических зонах, продолжительный устойчивый снежный покров в значительной степени усложняет функционирование городской среды [4]. Проблемы, связанные со снежным покровом, включают ограничение пропускной способности транспортной инфраструктуры, снижение скорости движения транспорта, увеличение вероятности дорожно-транспортных происшествий, повышенный риск травмирования пешеходов. Дворовые пространства становятся непреодолимыми для маломобильных групп населения. В городах требуется проведение специальных масштабных работ по очистке территорий и удалению снега в зимний период. При нехватке ресурсов коммунальных служб для своевременной уборки снега происходит накопление больших снежных масс на магистралях, дорогах, пешеходных зонах. Городское сообщество уделяет повышенное внимание качеству содержания городской среды в зимний период [5, 6]. Негативные эффекты усугубляются при сильных и затяжных снегопадах. Снегопад считается сильным, если количество выпавших осадков > 6 мм за 12 часов, а при выпадении > 20 мм за 12 часов снегопад переходит в разряд опасного природного явления [7].

Глобальные климатические изменения оказывают влияние также на характеристики снежного покрова [8]. С одной стороны, климатические модели предсказывают уменьшение снежного покрова в Северном полушарии при росте глобальной температуры приземного воздуха в XXI в., с другой стороны, по данным Росгидромета, в зимний период в холодных регионах России будет увеличиваться

снегонакопление [8], в Уральском регионе отмечается увеличение частоты интенсивных снегопадов.

Повышение и поддержание необходимого уровня содержания и благоустройства городских территорий в зимний период является актуальной и важной задачей деятельности муниципальных служб.

В настоящем исследовании поставлена цель проанализировать современное состояние содержания городских территорий и уборки снега в зимний период на примере г. Екатеринбурга.

## **2. Материалы и методы**

### **2.1. Общая характеристика г. Екатеринбурга и организации благоустройства**

Екатеринбург – столица Свердловской области и Уральского федерального округа, крупнейший на Урале культурный, научно-образовательный и промышленный центр. Население Екатеринбурга на 2023 г. составляет около 1 540 000 человек [9].

Екатеринбург расположен на стыке восточных предгорий Среднего Урала и Зауральской складчатой возвышенности [10]. Рельеф региона крупнохолмистый. Город находится в умеренном климатическом поясе. По классификации климатов Григорьева А. А. и Будыко М. И. Екатеринбург расположен в зоне II3D влажного климата с умеренно теплым летом, умеренно суровой и снежной зимой [11, 12].

Формирование значительного по мощности устойчивого снежного покрова создает ряд инфраструктурных проблем при облуживании и эксплуатации города. Своевременная уборка снега после снегопада критически важна для функционирования города в нормальном режиме. В Екатеринбурге содержание объектов УДС и придомовых территорий регулируется Правилами благоустройства территории муниципального образования «город Екатеринбург» [13].

За счет средств бюджета города содержится 15,2 млн м<sup>2</sup> дорог, 4,6 млн м<sup>2</sup> тротуаров, а также 16,7 млн м<sup>2</sup> придорожных газонов. Общая площадь дорог и тротуаров, требующих уборки от снега в зимний период за счет муниципального бюджета, составляет 19,8 млн м<sup>2</sup> [14]. Для уборки дорог от снега привлекаются муниципальные предприятия и при необходимости подрядные организации.

Придомовые территории многоквартирных домов (МКД) обслуживаются управляющими компаниями за счет средств собственников жилья [15]. По результатам ранее проведенных ландшафтных обследований в Екатеринбурге [16] общая площадь внутриворотовых проездов и тротуаров составляет 883 м<sup>2</sup> на один МКД. С учетом того, что всего в городе 7 808 МКД, общая площадь внутриворотовых проездов и тротуаров, на которых необходимо производить уборку снега в зимний период, составляет примерно 16,5 млн м<sup>2</sup>. Убранный снег размещается на газонах, в проездах, на других внутриворотовых зонах. Вывоз снега с придомовых территорий не предусмотрен минимальным перечнем услуг и работ, необходимых для обеспечения надлежащего содержания общего имущества в многоквартирном доме [17]. Вывоз снега осуществляется как дополнительная услуга и производится по решению собственников в инициативном порядке.

Источником информации о качестве уборки в Екатеринбурге является информационная служба Администрации города [20]. По данным Администрации Екатеринбурга, уборка снега на дорогах и тротуарах УДС проводится муниципальными предприятиями и организациями по муниципальным контрактам [21]. В соответствии с регламентами уборки осуществляется сдвигание и сметание снега на обочины, формирование снежных валов, а затем вывоз снега на полигоны.

### **2.2. Источники метеорологических данных**

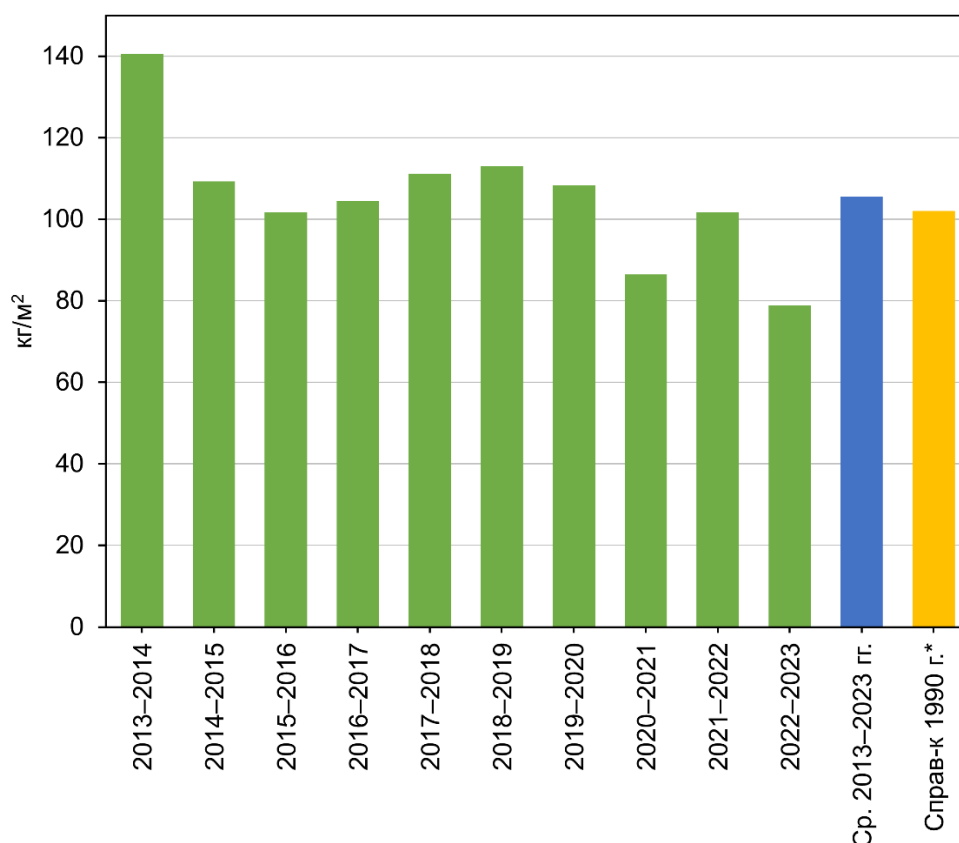
В качестве архивных данных по количеству снеговых осадков и их периоду выпадений в Екатеринбурге была использована информация из научно-прикладного

справочника по климату СССР [18]. Справочник предназначен для обеспечения различных отраслей народного хозяйства климатической информацией в целях планирования, проектирования, строительства, эксплуатации энергетических систем, транспорта и др., а также для научных исследований.

Для анализа современного состояния содержания городских территорий и уборки снега в зимний период были взяты метеорологические данные (высота снежного покрова, количество выпавших осадков) с сайта [gr5.ru](http://gr5.ru) [19] за период с октября 2013 г. по апрель 2023 г. Этот ресурс разработан и сопровождается компанией ООО «Расписание Погоды», Санкт-Петербург, Россия, с 2004 г. Информация с сайта [gr5.ru](http://gr5.ru) используется для расчета средних многолетних значений высоты снежного покрова и количества выпадающих осадков, среднесуточного прироста снежного покрова, среднесуточных выпадений осадков.

### 3. Результаты

Результаты оценки накопления снега в Екатеринбурге за холодные периоды в 2013–2023 гг. представлены на рис. 1. Масса снега, накапливающаяся к концу зимы, варьируется от 80 до 140 кг/м<sup>2</sup> в различные годы. В среднем для 10 лет этого периода количество накопившегося снега составляет 106 кг/м<sup>2</sup>. Эта величина близка к данным, приведенным в справочнике 1990 г., которые соответствуют 101 кг/м<sup>2</sup> к началу снеготаяния (рис. 1). Необходимо обратить внимание на тренд на снижение накопления снега за период 2013–2023 гг., который отражен на рис. 1.



\*Справочник 1990 г. [17]: с. 263, табл. 4.26, твердые осадки (ноябрь–март)

Рис. 1. Масса выпавшего снега в холодные периоды 2013–2023 гг.

За 10 лет средняя продолжительность периода от установления устойчивого снежного покрова до начала интенсивного снеготаяния [10] составляет 160 сут. Среднесуточная интенсивность выпадения снега составляет 0,006 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>. С учетом

того, что средняя плотность свежеснегавшего снега (не более 24 часов после выпадения) составляет  $95 \text{ кг/м}^3$ , среднесуточная интенсивность выпадений соответствует примерно  $0,6 \text{ кг/м}^2$ .

В среднем наблюдается следующее количество снегопадов за зиму в зависимости от интенсивности (продолжительность снегопада до 4 сут.): 1–4 см – 19,4 шт., 5–10 см – 5 шт., 11–20 см – 2,8 шт., > 20 см – 0,8 шт.

По данным, опубликованным в открытых источниках [22, 23], в т. ч. в информационных ресурсах городской Администрации Екатеринбурга, в период после снегопада из города на снежные полигоны вывозится 5 000–7 000 т снега в день, при необходимости вывоз снега увеличивается до 10 000 т снега, а при привлечении подрядных организаций до 15 000 т в день.

Представители городской Администрации приводят следующие данные по количеству снега, который вывозился в течение зимнего периода на снежные полигоны с территорий дорог и тротуаров УДС, которые содержатся за счет муниципального бюджета [24]: за зиму 2020–2021 гг. – 1 080 630 т, за зиму 2021–2022 гг. – 1 132 264 т.

В среднем за 10 лет накопление снега на городских территориях характеризуется следующими параметрами: общая масса снега, выпавшего на дорогах и тротуарах УДС, – 2,1 млн т; общая масса снега, выпавшего на газонах УДС, – 1,8 млн т; общая масса снега, выпавшего на тротуарах и проездах во дворах, – 0,67 млн т.

Рекордный снегопад за последнее время наблюдался 26–27 декабря 2023 г. и составил 29 см свежеснегавшего снега. С учетом того, что зимний период 2023–2024 гг. на момент подготовки статьи не закончился, другие параметры этой зимы не рассматривались.

С учетом того, что на полигоны с территорий дорог и тротуаров УДС вывозится в среднем 1,1 млн т снега, доля снега, остающегося на территории города, составляет примерно 43 % от общей массы выпавшего снега (1 млн т). Среднесуточный вывоз снега на полигоны составляет примерно 7 000 т. С учетом состояния улиц и тротуаров к концу зимнего сезона можно считать, что уборка и вывоз на полигоны 57 % снега в целом обеспечивает приемлемую степень уборки города от снега.

С учетом рассчитанной среднесуточной скорости уборки построена модельная динамика накопления снега на территории города для улиц и тротуаров УДС (рис. 2). При построении рисунка принято, что выпадение снега происходит с периодичностью 21 день и интенсивностью, равной сумме среднесуточных выпадений за этот период. На рис. 2 видно, что за период между снегопадами при существующей интенсивности уборки и интенсивности вывоза снега на полигоны –  $7 000 \text{ т/сут.}$  – муниципальные предприятия имеют возможность произвести необходимый объем уборки снега только к началу следующего снегопада. При этом работы производятся ежедневно, без простоя техники. К концу холодного периода и началу интенсивного снеготаяния на дорогах и тротуарах УДС накапливается примерно  $50 \text{ кг/м}^2$  снежной массы. В случае если снег, невывезенный с дорог и тротуаров на полигоны, будет перенесен на газоны по обочинам дорог, то масса снега на газонах достигнет  $166 \text{ кг/м}^2$ .



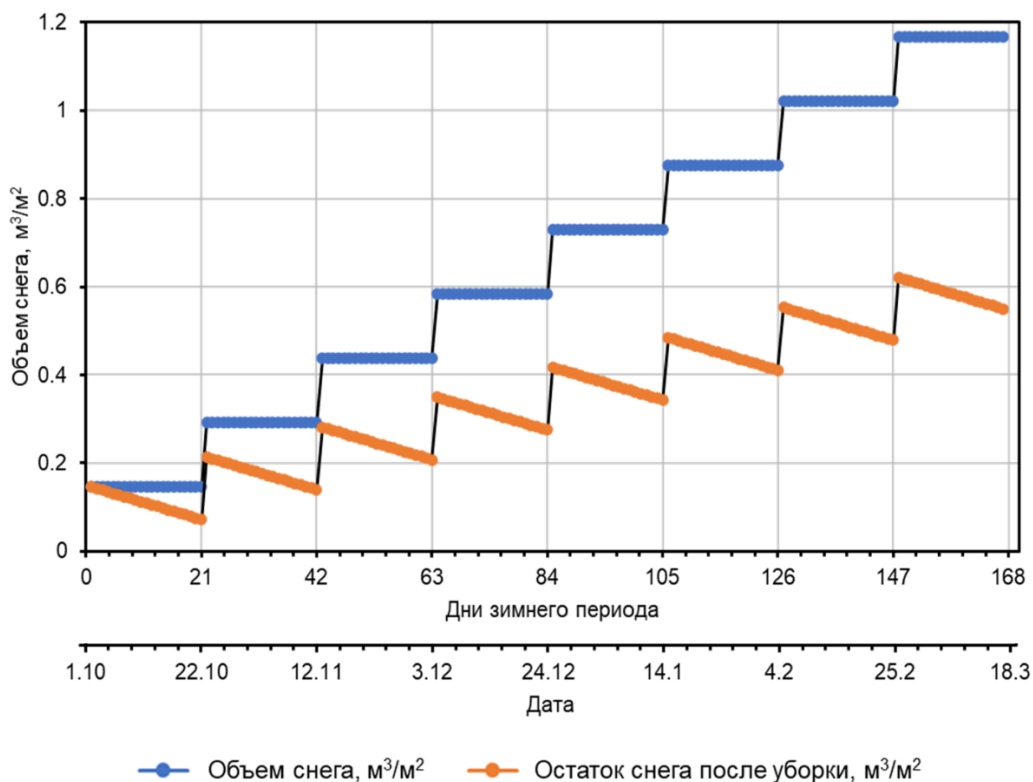


Рис. 2. Модель динамики накопления и остатка снега (условный объем свежеснегосыпавшего снега, плотность  $95 \text{ кг/м}^3$ ) после уборки при равномерном выпадении осадков раз в 21 день

На рис. 3 показаны результаты расчета периода времени, необходимого для уборки снега с территорий дорог и тротуаров УДС и вывоза 57 % выпавшего снега на полигоны, в зависимости от интенсивности разового снегопада. Выполнены расчеты для трех интенсивностей уборки: 1) уборка с вывозом 7 000 т снега в день (коэффициентах уборки  $k = 1$ ), 2) при увеличении интенсивности уборки в два раза ( $k=2$ ), 3) в три раза ( $k=3$ ). Как видно на рис. 3, при выпадении снега на уровне 10 см для уборки при существующей интенсивности потребуется 15 суток. Для уборки в такой же срок после более интенсивного снегопада, который может происходить несколько раз за зиму, необходимо увеличивать интенсивность уборки.

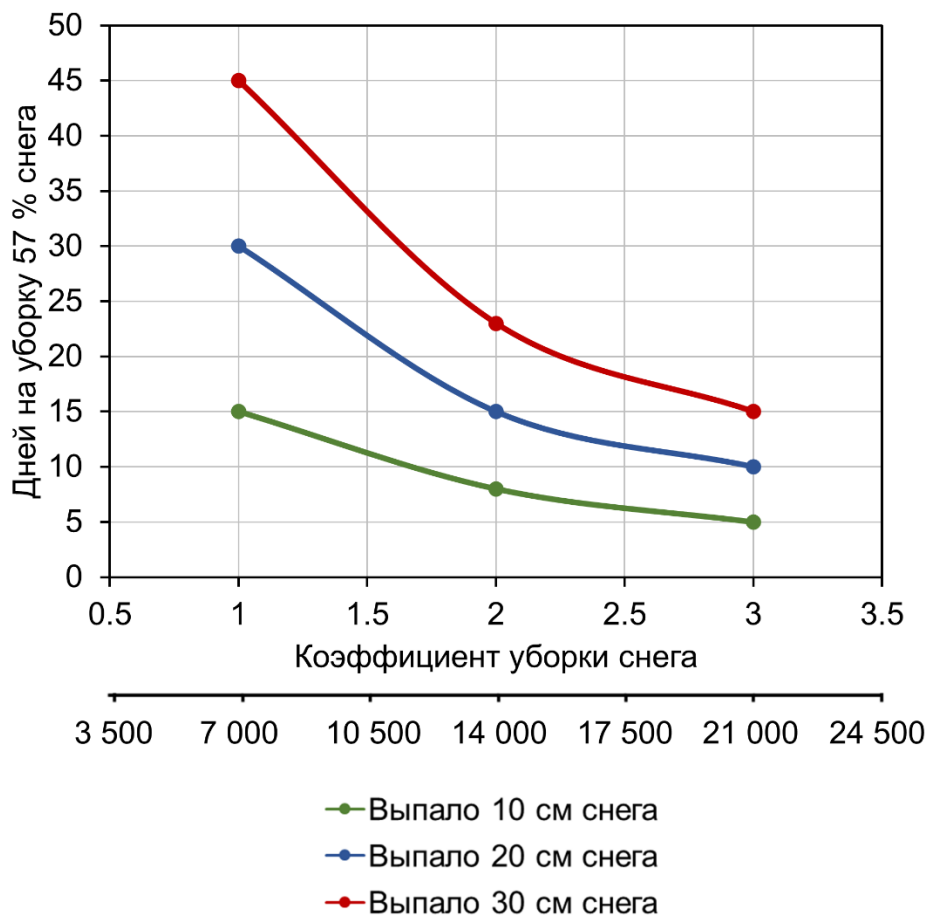


Рис. 3. Зависимость продолжительности для уборки 57 % от количества выпавшего снега и интенсивности уборки

Результаты моделирования уборки и вывоза снега с территорий дорог и тротуаров УДС в случае рекордного снегопада представлены на рис. 4. Рассчитана доля убранного снега для четырех сценариев интенсивности уборки, в т. ч. в качестве близкого к реальному рассмотрен сценарий, восстановленный по данным информационной службы Екатеринбурга [22]. Как видно из рис. 4, при реальном сценарии показатель уборки 57 % достигается более чем через месяц после рекордного снегопада. Существенная задержка уборки связана с низкой интенсивностью работ в новогодние праздники. Задача проведения уборки в срок 12 дней могла быть решена только при привлечении дополнительных ресурсов и повышении ежедневной интенсивности уборки и вывоза снега на полигоны до 24 000 т.

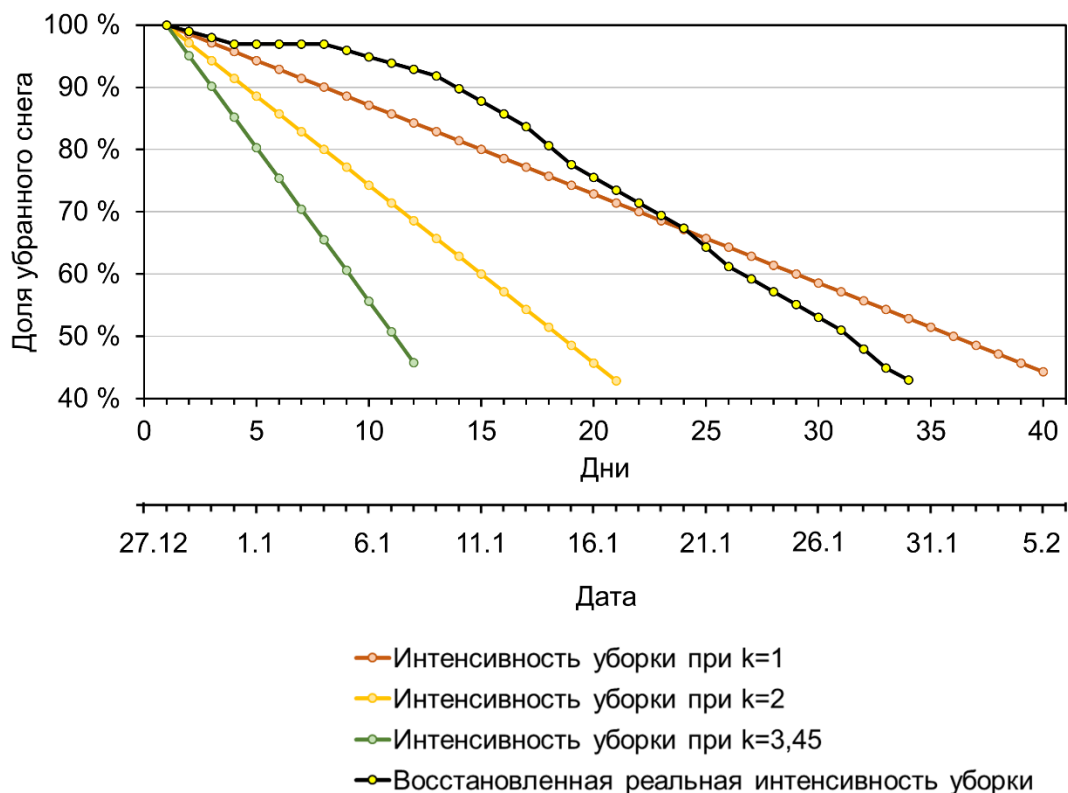


Рис. 4. Модель динамики уборки снега в период после рекордного снегопада (РС) 26–27 декабря 2023 г. при различных повышающих коэффициентах уборки и восстановленной реальной интенсивности уборки

С учетом полученного среднегодового значения накопления снега за зимний период и площади тротуаров и проездов внутри дворов МКД общая масса снега к концу зимнего периода на этих территориях составит 730 000 т. На один МКД в среднем приходится 93,5 т снега. В информационных источниках отсутствуют данные, которые позволяют более подробно проанализировать уборку снега на придомовых территориях МКД.

#### 4. Обсуждение

Уборка снега является одной из важных процедур содержания городской среды в зимний период, она производится для поддержания функционирования городской инфраструктуры, общественного транспорта и безопасного движения автотранспорта по дорогам и пешеходов по тротуарам. Кроме этого, уборка снега позволяет удалить с территории жилых кварталов пыль и грязь, накопленные в снеге [25], а также снизить объем поверхностного стока при весеннем снеготаянии. В Екатеринбурге, как и в других российских городах, с учетом законодательства, ответственность за уборку снега несут различные лица и организации, в зависимости от юридического статуса участка. Качество уборки снега в глазах граждан является одним из важных показателей, характеризующих работу городской Администрации.

Проведенный анализ показал, что глобальные климатические изменения не повлияли на годовое количество осадков в виде снега и продолжительность устойчивого снежного покрова в Екатеринбурге. В целом наблюдается соответствие параметров, характеризующих снеговые выпадения за 2013–2023 гг., многолетним данным, указанным в климатическом справочнике СССР за 1990 г. Исключение составляет интенсивность рекордного снегопада, который за весь период наблюдения произошел зимой 2023–2024 гг.

В среднем в Екатеринбурге за зиму выпадает 3,9 млн т снега на участках УДС и 1,6 млн т во дворах (из них 0,67 млн т на внутривидовых проездах и тротуарах). Таким образом, для полной очистки общественных пространств, улиц, дворов из города необходимо вывезти 5,5 млн т снега. Для оценки общей массы снега, которую необходимо вывозить из города, к этой величине необходимо добавить снег, выпавший на территориях предприятий, организаций и др.

Муниципальные предприятия вывозят из города примерно 1,1 млн т снега в год. Объем снега, вывозимый с территорий дворов, предприятий, организаций, на данный момент не установлен. Уборка снега на участках УДС ограничивается вывозом на полигоны примерно 57 % выпавшего снега. По-видимому, эта величина обеспечивает степень уборки, необходимую для приемлемого уровня функционирования транспортной и пешеходной инфраструктуры. Однако значительная часть снега остается на обочинах и придорожных газонах до периода снеготаяния. Можно предположить, что в весенний период только на территории УДС поверхностный сток формируется в результате таяния примерно 2,8 млн т снега. Также большое количество снега формирует поверхностный сток во дворах. Интенсивный весенний поверхностный сток увеличивает интенсивность эрозии грунтов и может являться одним из факторов образования большого количества грязи на улицах города.

Плановая интенсивность уборки снега муниципальными предприятиями, которая характеризуется вывозом на полигоны 5–7 тыс. т снега, позволяет обеспечить уборку при регулярных снегопадах низкой интенсивности до начала следующего снегопада. Фактически такой график уборки предполагает, что значительное время после снегопада количество снега в городе остается на уровне выше необходимого для нормального функционирования транспортной и пешеходной инфраструктуры. При существующей интенсивности выпадения снежных осадков и их повторяемости увеличение объемов уборки снега в два раза существенно повысит продолжительность периода нормального функционирования городской инфраструктуры. Увеличение объемов уборки снега более чем в три раза нецелесообразно. В случае снегопада повышенной, рекордной интенсивности (на уровне 20–30 см свежеснегавшего снега) для сокращения сроков уборки хотя бы до двух недель и менее необходимо увеличивать интенсивность уборки снега более чем в три раза (до 24 тыс. т).

Существенный объем неубранного снега остается во дворах. В регламентах содержания дворовых пространств обычно нет требования по уборке и вывозу снега с газонов, детских площадок. Регламенты предусматривают очистку проездов и тротуаров. Вывоз снега из куч и валов осуществляется не всегда.

Большую проблему представляют утрамбованный снег и наледи на проездах, тротуарах и дорогах. С учетом климатических условий Екатеринбурга применение антигололедных смесей не всегда эффективно (смеси не применяются при низких температурах [26]). Для крупных городов с развитой транспортной инфраструктурой и большим количеством транспорта, в т. ч. общественного, расположенных в холодной климатической зоне, требуется разработка и внедрение новых технологий содержания УДС в зимний период.

Представленный в настоящей статье анализ состояния дел с уборкой снега в Екатеринбурге носит ограниченный характер, что обусловлено отсутствием в доступе полного объема данных, характеризующих реальную картину уборки и вывоза снега на территориях различного статуса, обслуживаемых различными предприятиями и организациями.

## 5. Выводы

1. В работе проанализированы данные о накоплении и уборке снега на УДС и придомовых территориях в Екатеринбурге.
2. За последние 10 лет в среднем накопление снега к концу холодного периода составляет  $106 \text{ кг/м}^2$ .

3. С дорог и тротуаров УДС убирается и вывозится на полигоны 57 % выпавшего снега.
4. Имеющиеся в городе ресурсы не обеспечивают своевременную уборку и вывоз снега с УДС при снегопадах высокой интенсивности.
5. Необходимо провести более подробный анализ уборки снега на территориях с различным статусом с использованием исходной рабочей документации.

## 6. Список литературы

1. Злыднева, Л. А. Влияние элементов ландшафта на распределение снежного покрова по данным натурных измерений и реанализа (на примере г. Перми) / Л. А. Злыднева, Е. В. Пищальникова // Вестник Удмуртского университета. Серия «Биология. Науки о Земле». – 2021. – № 3.
2. Крючков, А. Д. Влияние микроформ рельефа на распределение характеристик снежного покрова / А. Д. Крючков // Климатические изменения и сезонная динамика ландшафтов: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Екатеринбург, 22–24 апреля 2021 года. – Екатеринбург: [б.и.], 2021. – С. 58–67. – DOI 10.26170/KFG-2021-08.
3. Нестеренко, Ю. М. Влияние рельефа на сток поверхностных и подземных вод на Южном Урале / Ю. М. Нестеренко // БОНЦ УрО РАН. – 2017. – № 4.
4. Узлов, В. А. Основные физические параметры снежного покрова / В. А. Узлов, Г. И. Шишков, В. В. Щербаков // Труды НГТУ им. П. Е. Алексеева. – 2014. – № 1(103).
5. Тюменцы недовольны горами снега во дворах. Куда жаловаться? // НашГород.ру [Электронный ресурс]. – URL: <https://nashgorod.ru/news/2023-01-18/tyumentsy-nedovolny-gorami-snega-vo-dvorah-kuda-zhalovatsya-2640228> (дата обращения: 14.02.2024).
6. Мало трех абзацев текста в телеграм-канале мэра. Журналист Е1.RU – о том, что не так с уборкой города // Е1.RU [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.e1.ru/text/gorod/2023/12/27/73064141/> (дата обращения: 14.02.2024).
7. Пищальникова, Е. В. Циркуляционные условия формирования обильных снегопадов в Пермском крае / Е. В. Пищальникова // Географический вестник. – 2016. – № 1(36).
8. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. – СПб.: Научное издание «Наукоёмкие технологии», 2022. – 124 с.
9. Численность постоянного населения Российской Федерации по муниципальным образованиям на 1 января 2023 года (с учетом итогов Всероссийской переписи населения 2020 г.) // Федеральная служба государственной статистики (18 августа 2023) [Электронный ресурс]. – URL: [https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Bul\\_MO\\_2023.xlsx](https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Bul_MO_2023.xlsx) (дата обращения: 14.02.2023).
10. Селезнев, А. А. Метеорологические условия формирования поверхностного стока наносов в период весеннего снеготаяния в городской среде / А. А. Селезнев, А. Ф. Тетерин, И. В. Ярмошенко // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331, № 2. – С. 7–16.
11. Григорьев, А. А. Классификация климатов СССР / А. А. Григорьев, М. И. Будыко // Известия АН СССР. Сер. геогр. – 1959. – № 3. – С. 3–19.
12. Хромов, С. П. Метеорологический словарь / С. П. Хромов, Мамонтова. – Л. И. Гидрометеиздат, 1974. – 568 с.
13. Решение от 26 июня 2012 года № 29/61 «Об утверждении Правил благоустройства территории муниципального образования "город Екатеринбург"» Екатеринбургская городская дума (5 созыв, 61 заседание) [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/453119345> (дата обращения: 14.02.2023).
14. Постановление от 29 ноября 2016 года № 2353 «Об утверждении муниципальной программы "Улучшение благоустройства территории муниципального образования "город Екатеринбург" на 2017–2020 годы» // Администрация г. Екатеринбурга [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/429081577> (дата обращения: 14.02.2023).

15. Початкова, Е. И. Анализ соблюдения законодательства по благоустройству и содержанию придомовых территорий управляющими организациями в региональных центрах России / Е. И. Початкова, А. А. Селезнев // Траектория исследований – человек, природа, технологии. – 2023. – № 2(6). – С. 57–76. – DOI 10.56564/27825264\_2023\_2\_57. – EDN YAULWC.
16. Landscape Study of Sediment Formation and Transport in the Urban Environment / I. Yarmoshenko, G. Malinovsky, E. Baglaeva, A. Seleznev // Atmosphere. – 2020. – № 11(12):1320. – DOI: [10.3390/atmos11121320](https://doi.org/10.3390/atmos11121320).
17. Постановление от 3 апреля 2013 года № 290 «О минимальном перечне услуг и работ, необходимых для обеспечения надлежащего содержания общего имущества в многоквартирном доме, и порядке их оказания и выполнения» // Правительство Российской Федерации [Электронный ресурс]. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201304120004> (дата обращения: 14.02.2023).
18. Справочник по климату СССР. Выпуск 9. История и физико-географическое описание метеорологических станций и постов. – Свердловск: Фотоофсетная лаборатория Уральского УГМС, 1966. – 392 с.
19. Архив погоды на метеодатчике // «Расписание погоды» [Электронный ресурс]. – URL: <http://rp5.ru/> (дата обращения: 14.02.2023).
20. Информационный портал Екатеринбурга // ekb.org.ru [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ekburg.ru/> (дата обращения: 14.02.2023).
21. Приказ от 16.10.2023 №10/41/0139 «Об утверждении регламентов по комплексному содержанию объектов улично-дорожной сети и объектов зеленого хозяйства на 2024 год» // Администрация г. Екатеринбурга [Электронный ресурс]. – URL: <https://екатеринбург.рф/жителям/благоустройство/регламенты> (дата обращения: 14.02.2023).
22. Алексей Орлов: «С начала зимы на полигоны вывезли полмиллиона тонн снега» // ekb.org.ru [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ekburg.ru/news/0/92790-aleksey-orlov-s-nachala-zimy-na-poligony-vyvezli-polmilliona-tonn-snega/?auth> (дата обращения: 14.02.2023).
23. Коммунальщики вывезли 10 тысяч тонн снега из Екатеринбурга // ekb.org.ru [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ekburg.ru/news/2/86503-kommunalshchiki-vyvezli-tysyach-tonn-snega-iz-ekaterinburga--video/> (дата обращения: 14.02.2023).
24. Екатеринбург. Алексей Орлов: работа коммунальных служб и планы по озеленению города // ekb.org.ru [Электронный ресурс]. – URL: <https://in.ekburg.ru/news/34/87278-ekaterinburg--aleksey-orlov-rabota-kommunalnykh-sluzhb-i-plany-po-ozeleneniyu-goroda/> (дата обращения: 14.02.2023).
25. Seleznev, A. A. Assessment of Total Amount of Surface Sediment in Urban Environment Using Data on Solid Matter Content in Snow-Dirt Sludge / A. A. Seleznev, I. V. Yarmoshenko, G. P. Malinovsky // Environ. Process. 6. – 2019. – P. 581–595. – DOI: [10.1007/s40710-019-00383-w](https://doi.org/10.1007/s40710-019-00383-w).
26. Material application methodologies for winter road maintenance: a renewed perspective / S. Du, M. Akin, D. Bergner [et al.] // Canadian Journal of Civil Engineering. – 2022. – № 49(1). – P. 1–10. – DOI: 10.1139/cjce-2019-0465.

**Сведения об авторах:**

**Шевченко Андрей Викторович**, м. н. с. ИПЭ УрО РАН. г. Екатеринбург, Россия.  
Эл. почта: [av.shev98@gmail.com](mailto:av.shev98@gmail.com)

**Малиновский Георгий Петрович**, к. б. н., зав. лабораторией урбанизированной среды ИПЭ УрО РАН. г. Екатеринбург, Россия.

**Селезнев Андриан Анатольевич**, к. г.-м. н., ст. н. с. ИПЭ УрО РАН. г. Екатеринбург, Россия.

**Ярмошенко Илья Владимирович**, к. ф.-м. н., директор ИПЭ УрО РАН. г. Екатеринбург, Россия.

## BRIEF ANALYSIS OF SNOW REMOVAL IN A LARGE RUSSIAN CITY USING THE EXAMPLE OF THE CITY OF EKATERINBURG

A. V. Shevchenko, G. P. Malinovsky, A. A. Seleznev, I. V. Yarmoshenko

*Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia*

*In this paper long-term data (2013-2023) on snow accumulation and snow removal from the territories of the street and road network and yard spaces in the city of Ekaterinburg are analyzed. According to the results of the study, the snow accumulation until the beginning of snowmelt is estimated at 106 kg/m<sup>2</sup> on a 10-year average. On average, about 2.1 million tons of snow fall on city roads and sidewalks, 1.8 million tons on roadside lawns, and 1.6 million tons on residential areas (including 0.67 million tons on driveways and sidewalks). Approximately 57% of the snowfall is removed from the city's streets and sidewalks to snow receiving stations, while the remainder is expected to be left on roadside lawns, roadside shoulders, and other elements of the street and road network. Doubling the amount of snow removal will significantly increase the period of normal functioning of the city's infrastructure. In order to obtain a complete assessment of the current state of maintenance of all areas of the city in winter, it is necessary to additionally analyze the data on maintenance of areas not serviced by municipal enterprises.*

**Keywords:** city, snowfall, snow removal, snow accumulation.

### References

1. Zlydneva, L. A. Influence of landscape elements on the distribution of snow cover according to field measurements and reanalysis (on the example of Perm) / L. A. Zlydneva, E. V. Pischalnikova // Vestnik of Udmurt University. Series "Biology. Earth Sciences". – 2021. – № 3.
2. Kryuchkov, A. D. Influence of microforms of relief on the distribution of snow cover characteristics / A. D. Kryuchkov // Climatic changes and seasonal dynamics of landscapes: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference, Ekaterinburg, April 22–24, 2021. – Ekaterinburg: [b.i.], 2021. – P. 58–67. – DOI 10.26170/KFG–2021–08.
3. Nesterenko, Yu. M. Relief influence on the runoff of surface and groundwater in the Southern Urals / Yu. M. Nesterenko // BONTs Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. – 2017. – № 4.
4. Uzlov, V. A. Basic physical parameters of the snow cover / V. A. Uzlov, G. I. Shishkov, V. V. Shcherbakov // Proceedings of R. E. Alekseev NSTU. – 2014. – № 1(103).
5. Tyumen residents are dissatisfied with mountains of snow in yards. Where to complain? // NashGorod.ru [Electronic resource]. – URL: <https://nashgorod.ru/news/2023-01-18/tyumentsy-nedovolny-gorami-snega-vo-dvorah-kuda-zhalovatsya-2640228> (date of address: 14.02.2024).
6. Three paragraphs of text in the mayor's Telegram channel are not enough. Journalist E1.RU – about what is wrong with the cleaning of the city // E1.RU [Electronic resource]. – URL: <https://www.e1.ru/text/gorod/2023/12/27/73064141/> (date of address: 14.02.2024).
7. Pischalnikova, E. V. Circulation conditions of formation of heavy snowfalls in the Perm Territory / E. V. Pischalnikova // Geographical Bulletin. – 2016. – № 1(36).
8. The third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. General summary. – SPb.: Science-intensive technologies, 2022. – 124 c.
9. The number of permanent population of the Russian Federation by municipalities as of January 1, 2023 (taking into account the results of the All-Russian Population Census 2020) // Federal State Statistics Service (August 18, 2023) [Electronic resource]. – URL: [https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Bul\\_MO\\_2023.xlsx](https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Bul_MO_2023.xlsx) (date of reference: 14.02.2023).
10. Seleznev, A. A. Meteorological conditions of the surface sediment runoff formation during the spring snowmelt in the urban environment / A. A. Seleznev, A. F. Teterin, I. V. Yarmoshenko // Izvestiya Tomskogo polytechnicheskogo universitet [Proceedings of Tomsk Polytechnic University]. Engineering of georesources. – 2020. – T. 331. – № 2. – C. 7–16.
11. Grigoriev, A. A. Classification of climates of the USSR / A. A. Grigoriev, M. I. Budyko. – Izvestia AS USSR. Ser. geogr., 1959. – № 3. – c. 3–19.



12. *Khromov, S. P.* Meteorological dictionary / S. P. Khromov, Mamontova. – L. I. Gidrometeeoizdat, 1974. – 568 с.
13. Decision of June 26, 2012 № 29/61 "On Approval of the Rules of landscaping of the territory of the municipal formation "Ekaterinburg City"" Ekaterinburg City Duma (5th convocation, 61 sessions) [Electronic resource]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/453119345> (date of reference: 14.02.2023).
14. Resolution of November 29, 2016 N 2353 "On approval of the municipal program "Improvement of the improvement of the territory of the municipal formation "Ekaterinburg city" for 2017–2020 years" // Ekaterinburg City Administration [Electronic resource]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/429081577> (date of reference: 14.02.2023).
15. *Pochatkova, E. I.* Analysis of compliance with the legislation on landscaping and maintenance of adjacent territories by management organizations in the regional centers of Russia / E. I. Pochatkova, A. A. Seleznev // Trajectory of research – man, nature, technology. – 2023. – № 2(6). – P. 57–76. – DOI 10.56564/27825264\_2023\_2\_57. – EDN YAULWC.
16. Landscape Study of Sediment Formation and Transport in the Urban Environment / I. Yarmoshenko, G. Malinovsky, E. Baglaeva, A. Seleznev // Atmosphere. – 2020. – № 11(12):1320. – DOI: 10.3390/atmos1112131320.
17. Resolution of April 3, 2013 № 290 "On the minimum list of services and works required to ensure proper maintenance of the common property in an apartment building, and the procedure for their provision and performance" // Government of the Russian Federation [Electronic resource]. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201304120004> (date of circulation: 14.02.2023).
18. Reference book on the climate of the USSR. Issue 9. History and physiographic description of meteorological stations and posts. Sverdlovsk : Photo–offset laboratory of the Ural UHMS, 1966. – 392 с.
19. Weather archive on the weather sensor // "Weather schedule". [Electronic resource]. – URL: <http://rp5.ru/> (date of address: 14.02.2023).
20. Ekaterinburg information portal // [ekburg.ru](http://ekburg.ru) [Electronic resource]. – URL: <https://www.ekburg.ru/> (access date: 14.02.2023).
21. Order of 16.10.2023 № 10/41/0139 "On approval of regulations for the integrated maintenance of street and road network facilities and green facilities for 2024" // Ekaterinburg Administration [Electronic resource]. – URL: <https://екатеринбург.рф/жителям/благоустройство/регламенты> (date of reference: 14.02.2023).
22. Alexey Orlov: "Since the beginning of winter half a million tons of snow have been taken to the landfills" // [ekburg.ru](http://ekburg.ru) [Electronic resource]. – URL: <https://www.ekburg.ru/news/0/92790-aleksey-orlov-s-nachala-zimy-na-poligony-vyvezli-polmilliona-tonn-snega/?auth> (date of address: 14.02.2023).
23. Communal workers removed 10 thousand tons of snow from Ekaterinburg // [ekburg.ru](http://ekburg.ru) [Electronic resource]. – URL: <https://www.ekburg.ru/news/2/86503-kommunalshchiki-vyvezli-tysyach-tonn-snega-iz-ekaterinburga-video/> (date of address: 14.02.2023).
24. Ekaterinburg. Alexey Orlov: the work of public utilities and plans for greening the city // [ekburg.ru](http://ekburg.ru) [Electronic resource]. – URL: <https://in.ekburg.ru/news/34/87278-ekaterinburg-aleksey-orlov-rabota-kommunalnykh-sluzhb-i-plany-po-ozeleneniyu-goroda/> (date of address: 14.02.2023).
25. *Seleznev, A. A.* Assessment of Total Amount of Surface Sediment in Urban Environment Using Data on Solid Matter Content in Snow–Dirt Sludge / A. A. Seleznev, I. V. Yarmoshenko, G. P. Malinovsky // Environ. Process. 6. – 2019. – P. 581–595. – DOI: [10.1007/s40710-019-00383-w](https://doi.org/10.1007/s40710-019-00383-w).
26. Material application methodologies for winter road maintenance: a renewed perspective / S. Du, M. Akin, D. Bergner [et al.] // Canadian Journal of Civil Engineering. – 2022. – № 49(1). – P. 1–10. – DOI: 10.1139/cjce-2019-0465.

## РЕАЛИЗАЦИЯ ROC-АНАЛИЗА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОРОГОВЫХ ЗНАЧЕНИЙ НОВЫХ АНТРОПОМЕТРИЧЕСКИХ ИНДЕКСОВ BRI, ABSI, LAP

Н. В. Билаш<sup>1</sup>, Е. Д. Константинова<sup>2</sup>, С. Ю. Огородникова<sup>2</sup>, Т. А. Маслакова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Уральский Федеральный университет им. первого Президента России  
Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> Институт промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

В статье представлены результаты ROC-анализа и определения пороговых значений антропометрических индексов: Body Roundness Index (BRI), A Body Shape Index (ABSI), Lipid Accumulation Product (LAP), которые позволяют выявить группу риска возникновения метаболического синдрома (МС). Используются ретроспективные данные 347 работников-мужчин, занятых во вредных условиях труда на пяти промышленных предприятиях Свердловской области. Разработана программа на высокоуровневом языке программирования общего назначения Python. Продемонстрирована возможность реализации ROC-анализа, определения диагностических пороговых значений антропометрических индексов, а также визуального позиционирования точки отсечения (Cut-off point) на графике. Полученные значения сравнили с результатами использования прикладного статистического пакета SPSS 29 (SPSS, Chicago, Illinois, USA). Диагностические пороги для четырех возрастных групп, найденные при помощи написанной программы, составили: BRI – (4,1–4,4), ABSI – (0,079–0,083), LAP – (49,7–70,5).

**Ключевые слова:** ROC-анализ; Cut-off point; диагностический порог; антропометрические индексы; метаболический синдром; вредные условия труда.

### 1. Введение

Классификация информации является важным компонентом вопросов принятия решений в различных областях науки и техники. Такие задачи, как прогнозирование или диагностика, – типичные прикладные примеры классификации [1].

С момента возникновения необходимости в создании классификаторов было разработано множество инструментов, включая линейный и квадратичный дискриминантный анализ, деревья классификации, нейронные сети, логистическую регрессию и др. [2].

Выбирая метод классификации, в первую очередь исходят из особенностей анализируемых данных, а также желаемой (требуемой) эффективности классификатора. Особенностям анализа медико-биологических данных и специфическим требованиям, предъявляемым к нему, посвящен ряд исследований [3]. Так, для выбора метода оценки профессионального риска существуют законодательно закрепленные критерии и рекомендации [4, 5]. В частности, в качестве одной из основных рекомендаций названо обеспечение возможности прослеживания, воспроизводимости и проверки процесса и результатов, а также простоты и понятности применяемого метода. Речь идет прежде всего о том, что алгоритмы, потенциально влияющие на жизнь и здоровье людей, должны быть контролируемы, а их решающие правила понятны специалисту в предметной области и легко интерпретируемы. Моделирование на основе регрессионного анализа отвечает всем требованиям, предъявляемым к обработке медико-биологических данных.

Любая статистическая модель нуждается в оценке качества ее работы. ROC-анализ, где основным показателем прогностической способности модели служит площадь под кривой (AUC), – один из распространенных методов оценки. В задачах бинарной классификации, к которым относится логистический регрессионный анализ,

ROC-кривая оценивает, насколько точно были классифицированы элементы заданного множества.

Данный метод анализа активно применяется в различных областях человеческой деятельности [6, 7]. Широкое применение ROC-анализ получил в медицине, в частности, при диагностике заболеваний или состояний.

С помощью ROC-анализа можно определять Cut-off point, имеющую прикладную значимость в качестве диагностического порогового значения наличия заболевания [8]. ROC-анализ реализован во многих статистических прикладных пакетах (Statistica, SPSS и др.), однако в современной ситуации использование зарубежного программного обеспечения не всегда возможно согласно Указу № 166 Президента Российской Федерации [9]. Возникает необходимость создания нового рабочего инструмента в виде отечественного программного обеспечения, функционал которого будет позволять строить классификаторы, проводить ROC-анализ и определять основные характеристики построенной модели.

По данным Всемирной организации здравоохранения, в настоящее время около 25–30 % взрослого населения в разных странах мира страдает от МС. Распространенность как МС, так и ожирения в Российской Федерации неуклонно растет, что мотивирует исследователей на поиск неинвазивных и бюджетных методов выявления лиц, входящих в группу риска [10]. Особого внимания заслуживают работники промышленных предприятий, занятые во вредных условиях труда. Прогрессирующее снижение численности населения трудоспособного возраста требует разработки научно обоснованного комплекса приоритетных мер, направленных на сохранение здоровья и трудового потенциала работающих [11]. Стоит отметить, что медсанчасти предприятий зачастую не имеют возможности проводить дорогостоящие комплексные исследования для оценки риска развития общесоматических заболеваний, не имеют в своем арсенале прикладных статистических пакетов, способных обработать большой объем медико-биологических данных, и не имеют в штате сотрудников, обладающих компетенциями в области анализа этих данных. Потребность медицины труда (как отрасли науки) в отечественных надежных рабочих инструментах оценки риска развития общесоматических заболеваний у работников при постоянном воздействии сверхнормативных уровней комплекса вредных производственных факторов не вызывает сомнений.

В качестве доступного инструмента диагностики такого патологического состояния, как МС, хорошо себя зарекомендовали так называемые новые антропометрические индексы [12–14]. Разработка новых (относительно классического индекса массы тела (ИМТ)) информативных антропометрических показателей была вызвана потребностью в более точном отражении типа распределения жировой ткани. Было обнаружено, что именно тип распределения жировой ткани тесно взаимосвязан с частотой развития артериальной гипертензии, сахарного диабета, атеросклероза и МС [15].

*Цель* – определить пороговые значения новых антропометрических индексов и оценить их прогностическую способность выявлять группу риска развития патологического состояния.

#### *Задачи*

##### *Основная:*

– исследовать прогностическую способность антропометрических индексов BRI, ABSI и LAP для выявления лиц с МС среди работников промышленных предприятий, занятых во вредных условиях труда.

##### *Прикладные:*

– разработать программу для построения классификатора и проведения ROC-анализа с последующим определением пороговых значений;

– сравнить характеристики моделей с данными, полученными с помощью прикладного пакета SPSS.

## 2. Материалы и методы

### 2.1. Исследуемая выборка

Клиническая часть исследования проводилась на базе Екатеринбургского медицинского научного центра профилактики и охраны здоровья работников промышленности Роспотребнадзора. В исследовании использованы ретроспективные данные 347 рабочих мужского пола в возрасте от 27 до 63 лет (средний возраст  $46,5 \pm 8,3$  лет), занятых во вредных условиях труда на пяти промышленных предприятиях Свердловской области. Сбор данных проводился в процессе планового медицинского осмотра за 2019 г.

Все испытуемые подписали письменное информированное согласие на обработку данных, протокол исследования был одобрен наблюдательным советом учреждения (протокол № 3 от 05.06.2023). У всех испытуемых измеряли рост, вес и окружность талии (ОТ). Рассчитан индекс массы тела. Также были взяты образцы крови, триглицериды (ТГ) сыворотки измерялись у подгруппы из 169 рабочих. Данные о диагнозе МС были взяты из медицинской карты пациента (истории болезни).

### 2.2. Антропометрические индексы

Антропометрические показатели BRI, ABSI и LAP рассчитывались по следующим формулам [15–17]:

$$BRI = 364,2 - 365,5 \sqrt{1 - \frac{OT^2}{\pi^2 \cdot \text{рост}^2}}; \quad (1)$$

$$ABSI = \frac{OT}{\sqrt{\frac{1}{IMT^3 \cdot \text{рост}^2}}}, \quad (2)$$

где  $IMT = \frac{\text{вес}}{\text{рост}^2}$

$$LAP = (OT - 65) \cdot ТГ \quad (3)$$

BRI был предложен Томасом и соавторами в 2013 г. как альтернатива ИМТ [15]. BRI более точно, чем ИМТ, определяет распределение жира в организме, учитывая округлость тела, и меньше зависит от пола и возраста. По мнению ряда авторов, BRI демонстрирует отличную прогностическую способность для определения распространенности МС в общей популяции, среди населения с ожирением и избыточным весом, а также у женщин в постменопаузе [12, 13, 17–19]. Пороговые значения BRI для мужчин: норма < 5, для избыточного веса 5–5,5, ожирение > 5,5. Для женщин: норма < 4,5, для избыточного веса 4,5–5, ожирение > 5.

Показатель ABSI был предложен в 2012 г. Nir Y. Krakauer и Jesse C. Krakauer [16]. Показывая отношение между ОТ, ростом и весом, ABSI является количественным показателем формы тела. Чем выше ABSI, тем выше доля брюшного жира по сравнению с другими частями тела. Нормальный уровень ABSI для мужчин составляет от 0,078 до 0,089, а для женщин от 0,084 до 0,094. Значение ABSI выше 0,11 указывает на высокий риск развития метаболических нарушений и сердечно-сосудистых заболеваний.

Термин LAP впервые упоминается в работах H.S. Kahn [14, 17], в которых данный индекс рассматривался в качестве маркера избыточного накопления липидов у взрослых. Вычисление LAP основано на двух простых показателях – обхват талии и содержание триглицеридов в плазме крови натощак. Это делает его удобным инструментом для выявления предрасположенности к метаболическим и сердечно-сосудистым заболеваниям. Согласно данным исследования ЭССЕ-РФ, среднее значение LAP у мужчин без ишемической болезни сердца и сахарного диабета в возрасте 25–64 года составило  $45,5 \pm 0,88$  см·ммоль/л. Диапазон варьирования значений LAP в нашей выборке составил 5,9–163,6 см·ммоль/л.

### 2.3. Статистический анализ

Для оценки качества моделей бинарных классификаторов использовался ROC-анализ. Оптимальные пороговые значения для отнесения объектов к тому или иному классу определялись путем построения ROC-кривых. Построение ROC-кривых, вычисление значений индекса Юдена и определение пороговых значений для антропометрических индексов осуществлялось как в прикладном пакете SPSS, так и с использованием новой программы, написанной при помощи языка программирования Python.

Различия групповых средних оценивались с помощью метода сравнения долей, для сравнения медиан был использован критерий Краскела – Уолесса. Статистическая значимость различий оценивалась на уровне 0,05.

### 3. Результаты

36,3 % работников исследуемой выборки имели метаболический синдром. Выборка была разбита на возрастные квартили Q<sub>1</sub>-Q<sub>4</sub>. В табл. 1 приведена распространенность МС, медианы антропометрических индексов, 25 и 75 перцентили (Me (P25–P75)).

Таблица 1. Распространенность МС (%) и медианы антропометрических индексов работников по возрастным группам

Параметр	Возраст, лет				p-значение
	Q <sub>1</sub> 27–40 n = 84 (24,7 %)	Q <sub>2</sub> 41–46 n = 81 (23,8 %)	Q <sub>3</sub> 47–52 n = 87 (25,6 %)	Q <sub>4</sub> 53–63 n = 88 (25,9 %)	
n (%)					
Метаболический синдром	15 (17,9 %)	29 (35,8 %)	39 (42,9 %)	43 (47,3 %)	<0,001
Me (P25–P75)					
BRI, отн. ед.	4,0 (3,2–4,7)	4,4 (3,7–5,4)	5,0 (4,0–5,8)	5,1 (4,1–5,9)	<0,001
ABSI, м <sup>11/6</sup> · кг <sup>-2/3</sup>	0,079 (0,077–0,082)	0,080 (0,078–0,083)	0,082 (0,080–0,084)	0,085 (0,081–0,087)	<0,001
LAP, см·ммоль/л	40,3 (23,1–54,6)	50,5 (35,8–91,1)	65,5 (39,6–83,2)	65,6 (34,6–93,5)	<0,001

\* Для оценки статистически значимых различий распространенности МС в возрастных квартилях использован метод сравнения долей, для оценки различий медиан использовался критерий Краскела – Уолиса.

Как видно из табл. 1, с увеличением возраста распространенность МС возрастает в 2,6 раза. Медианы всех исследуемых антропометрических индексов статистически значимо возрастают с увеличением возраста ( $p < 0,05$ ).

#### 3.1. Построение и анализ ROC-кривых с помощью программы на языке Python

По значениям индекса Юдена были определены пороговые значения индексов. На основании полученных значений были сформированы списки специфичности (Sp) и чувствительности (Se), по которым были построены ROC-кривые. На рис. 1 представлен промежуточный результат проведения поквартильного ROC-анализа антропометрического индекса BRI для всей исследуемой выборки.

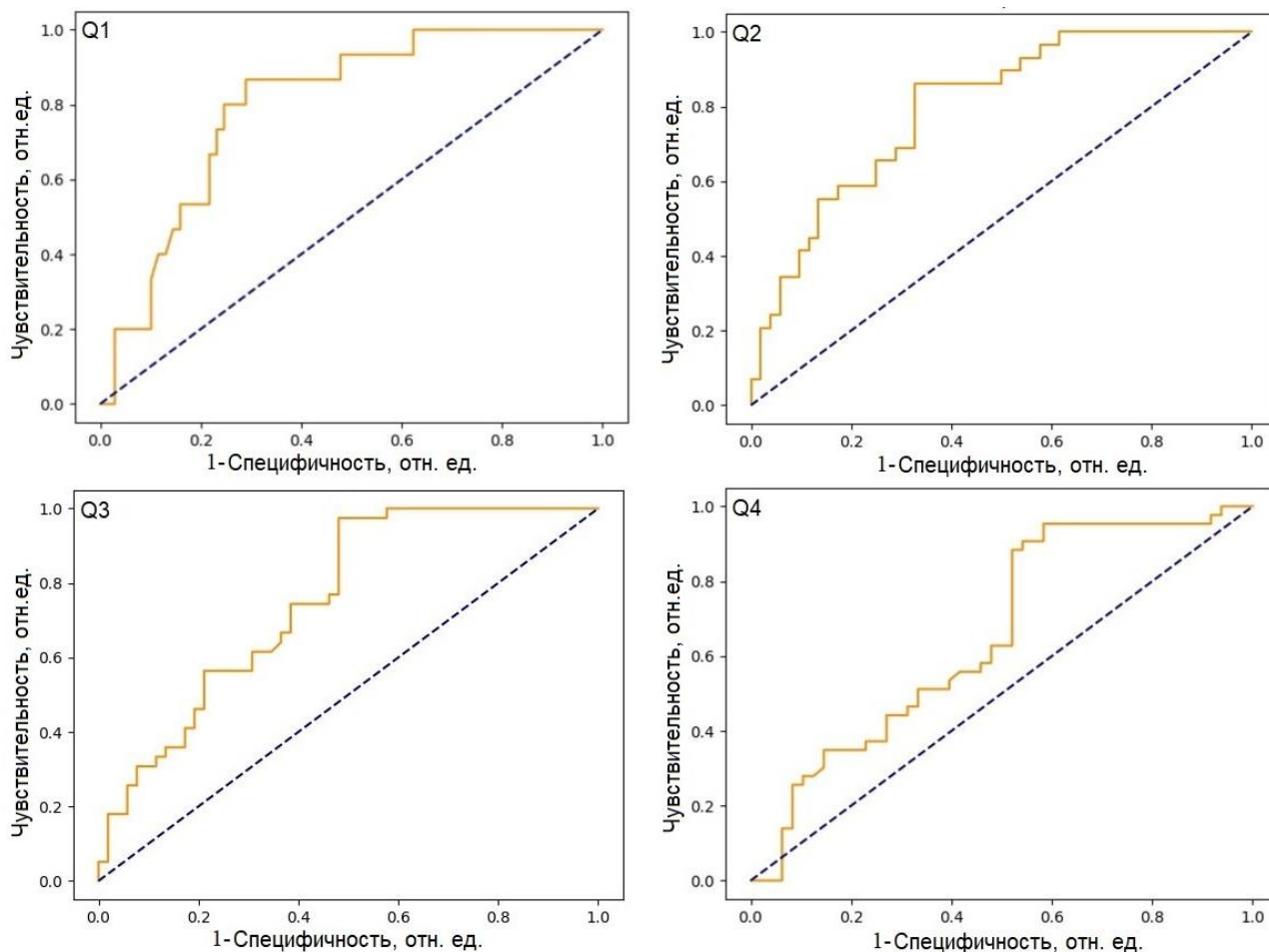


Рис. 1. ROC-анализ индекса BRI для возрастных кватрилей

### 3.1.1. Оценка прогностической способности и определение пороговых значений для антропометрических индексов

Для определения пороговых значений антропометрических индексов была применена функция, исходными данными для которой являлись список порогов и основная база данных. На основе вычисленных порогов создавался бинарный список, предсказывающий наличие/отсутствие МС. Затем анализировалась матрица ошибок. На следующем этапе алгоритма вычислялись чувствительность и специфичность.

В табл. 2 представлены характеристики моделей, полученных в результате анализа ROC-кривой. Исходя из представленных данных, наибольшую прогностическую ценность для мужчин в возрасте от 41 до 46 лет (Q2) продемонстрировал индекс BRI (AUC = 0,799). Наилучшие характеристики по остальным возрастным кватрилям, Q1 и Q3–Q4, имели модели для антропометрического индекса LAP (AUC = 0,931; 0,785 и 0,873). Индекс ABSI имел самые низкие значения AUC и, следовательно, худшую прогностическую способность.

Затем определялись пороговые значения антропометрических индексов для каждой возрастной кватрили. Для индекса BRI диагностические пороги варьировали в пределах 4,1–4,4 отн. ед., для ABSI – 0,079–0,083 м<sup>11/6</sup>·кг<sup>-2/3</sup>, а для LAP – 49,7–70,5 см·ммоль/л.

Для оценки качества исследуемой модели классификации были использованы дополнительные метрики (Accuracy, Precision, F1-score), определение которых в прикладных статистических пакетах не доступно.

Итоговый вид результата работы программы представлен на рис. 2.

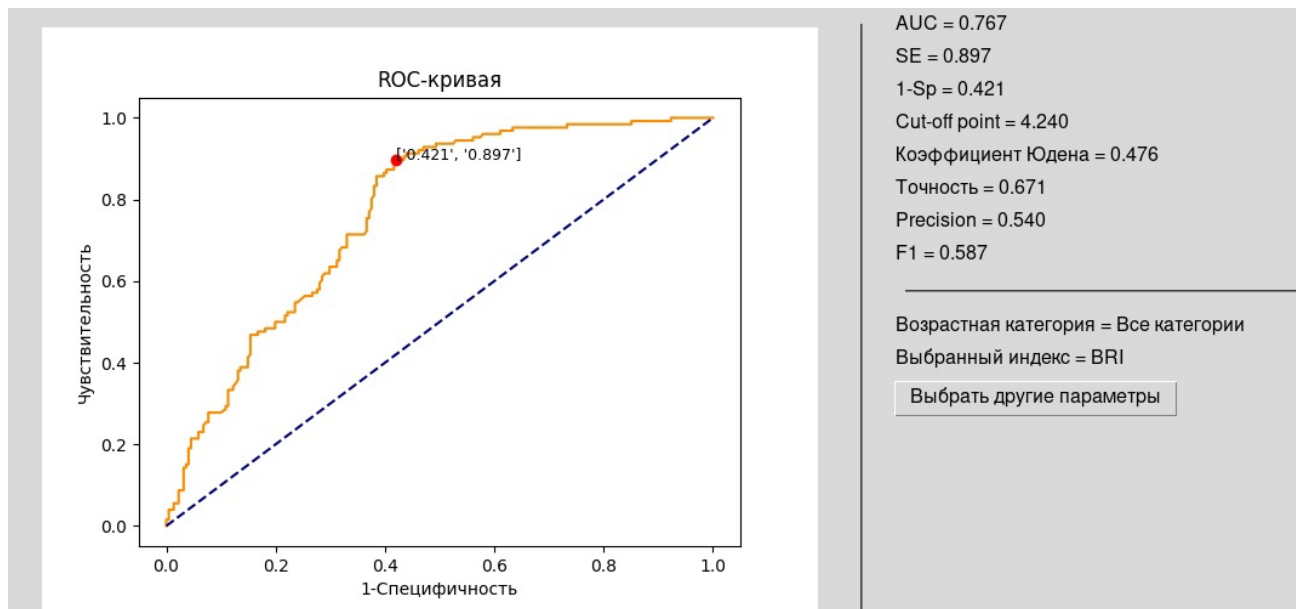
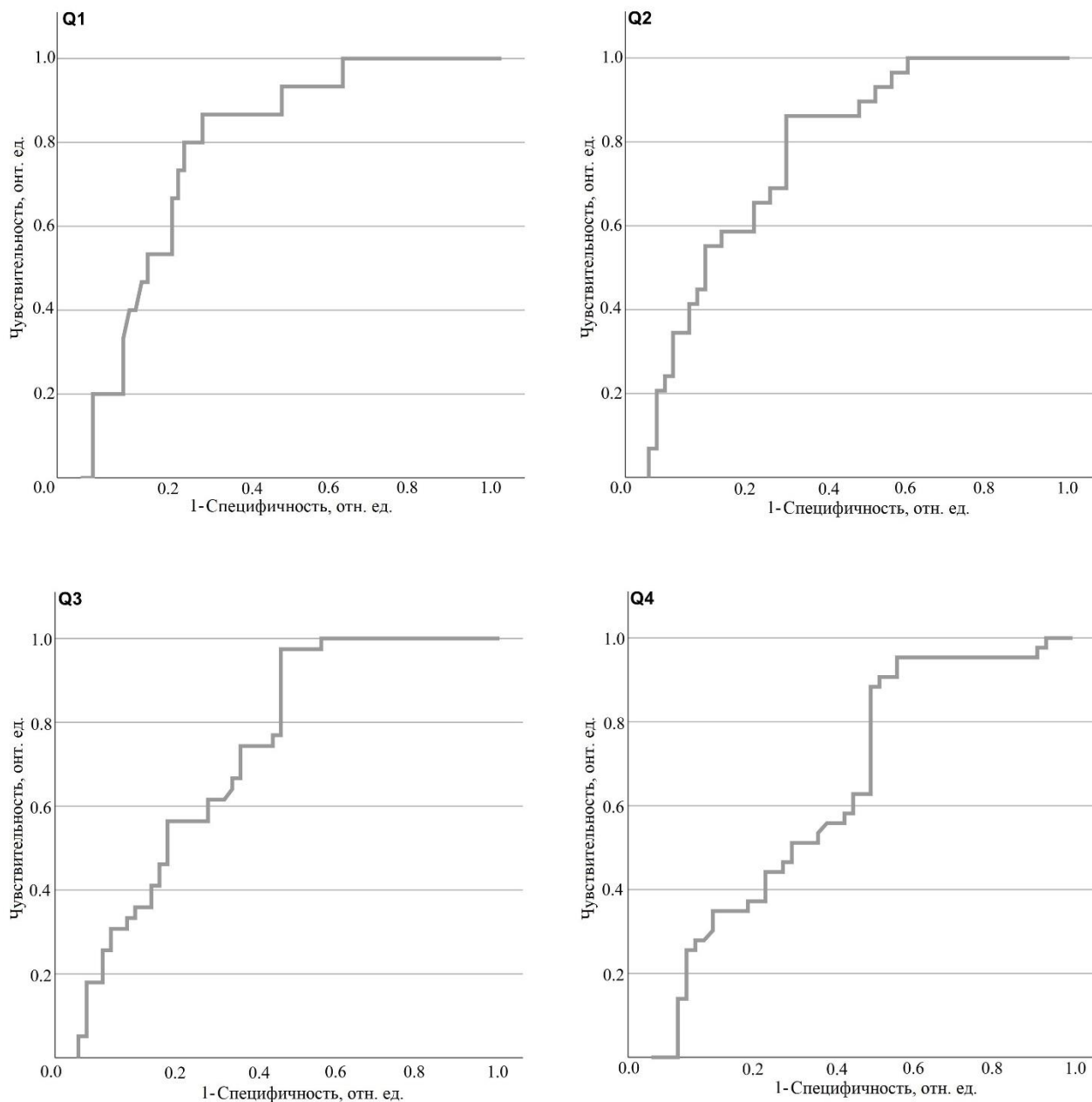


Рис. 2. ROC-анализ индекса BRI

## 3.2. Построение и анализ ROC-кривых с помощью прикладного пакета SPSS

### 3.2.1. Построение ROC-кривых

Для определения достоверности полученных результатов был проведен аналогичный анализ ROC-кривых в прикладном пакете SPSS. Полученные кривые представлены на рис. 3.



• Рис. 3. ROC-кривые индекса BRI для возрастных кватилей в прикладном пакете SPSS

### 3.2.2. Оценка прогностической способности моделей и определение пороговых значений для антропометрических индексов

По результатам анализа всех возрастных категорий в прикладном пакете SPSS нами также были определены пороговые значения антропометрических индексов. Для BRI диагностический порог составляет 4,38 отн. ед., для ABSI –  $0,0815 \text{ м}^{11/6} \cdot \text{кг}^{-2/3}$ , а для LAP – 60,31 см·ммоль/л.

В предметном смысле вычисленное численное пороговое значение индекса означает следующее: работники, у которых зафиксированы значения индексов, равные или выше пороговых, имеют высокий риск развития метаболического синдрома и должны быть направлены на дополнительное углубленное обследование. Работники со значениями индексов ниже пороговых не находятся в настоящий момент в группе риска развития МС.

В табл. 2 представлены характеристики моделей, полученные в результате анализа ROC-кривой в прикладном пакете SPSS и новой программы.



Таблица 2. Характеристики ROC-кривых антропометрических индексов для возрастных квартилей

Антропометрический индекс	Q	SPSS				Написанная программа			
		AUC	Cut-off point	Se	1-Sp	AUC	Cut-off point	Se	1-Sp
BRI, отн. ед.	1	0,800	4,3	0,867	0,290	0,800	4,3	0,867	0,290
	2	0,799	4,4	0,862	0,327	0,799	4,4	0,862	0,327
	3	0,753	4,1	0,974	0,481	0,753	4,1	0,974	0,481
	4	0,655	4,3	0,953	0,583	0,655	4,3	0,953	0,583
	1–4	0,767	4,2	0,897	0,421	0,767	4,2	0,897	0,421
ABSI, $m^{11/6} \cdot kg^{-2/3}$	1	0,613	0,083	0,333	0,058	0,613	0,083	0,333	0,058
	2	0,713	0,079	0,828	0,404	0,713	0,079	0,828	0,404
	3	0,672	0,081	0,718	0,385	0,672	0,081	0,718	0,385
	4	0,637	0,082	0,860	0,604	0,637	0,082	0,860	0,604
	1–4	0,695	0,082	0,683	0,362	0,695	0,082	0,683	0,362
LAP, см·ммоль/л	1	0,931	59,3	0,818	0,027	0,931	59,3	0,818	0,027
	2	0,774	50,5	0,739	0,200	0,774	50,5	0,739	0,200
	3	0,785	47,7	0,905	0,429	0,785	47,7	0,905	0,429
	4	0,873	67,2	0,727	0,071	0,873	67,2	0,727	0,071
	1–4	0,852	60,2	0,740	0,163	0,852	60,2	0,740	0,163

Исходя из представленных в табл. 2 данных, наибольшую прогностическую ценность для мужчин в возрасте от 41 до 52 лет ( $Q_2$ - $Q_3$ ) демонстрирует BRI (AUC = 0,753 и 0,799). Наилучшие характеристики по возрастным квартилям  $Q_1$  и  $Q_4$  имеют LAP (AUC = 0,931 и 0,873). ABSI имеет самые низкие значения AUC и, следовательно, худшую прогностическую способность.

#### 4. Обсуждение

Референсных значений для индексов BRI, ABSI и LAP для работников мужчин европеоидной расы, занятых во вредных условиях труда, в литературных источниках обнаружено не было.

Основные характеристики классификатора, которые возможно получить при помощи ROC-анализа, – чувствительность и специфичность [3]. Данные показатели отражают способность модели верно классифицировать положительные и отрицательные исходы соответственно.

Одной из наиболее эффективных мер оценки диагностической работы классификатора является коэффициент Юдена, который представляет собой разницу между долей истинно положительных и ложноположительных результатов классификации [20]. Близость данного индекса к единице говорит о лучшей работе построенной модели.

ROC-анализ представлен в самых известных прикладных статистических пакетах, идея модернизации некоторых его параметров прослеживается и по сей день. Примером написания уникального кода для реализации ROC-анализа является статья [21], где было разработано специальное приложение с использованием языка программирования (Java) с возможностью сравнения двух или более ROC-кривых, которые пересекаются друг с другом.

Согласно Указу Президента РФ работникам критической инфраструктуры (в т. ч. учреждений науки и образования) с 1 января 2025 г. зарубежные пакеты прикладных программ станут недоступны [9]. Данные обстоятельства послужили мотивацией для проведения настоящей работы – разработки отечественного рабочего инструмента для врача медицины труда. Была написана программа на языке Python для построения модели классификатора и реализации ROC-анализа прогностической

способности нескольких антропометрических индексов в определении метаболического синдрома.

В предлагаемой программе реализовано вычисление нескольких дополнительных, но не менее важных характеристик ROC-кривых – Accuracy, Precision и F1-мера, которые наряду с «классическими» метриками дают более полное описание качества полученного классификатора, а, следовательно, способны помочь с высокой точностью выбрать подходящий прогностический фактор и диагностические пороги.

## 5. Заключение

1. Результаты нашего исследования свидетельствуют о целесообразности практического применения новых антропометрических индексов для выявления группы риска развития МС среди работников, занятых во вредных условиях труда.
2. Лучшую прогностическую способность для мужчин в возрасте 27–40 лет и 53–63 лет продемонстрировала модель с индексом LAP (AUC 0,931 и 0,873 соответственно). Наилучшими характеристиками для возрастного диапазона 41–46 лет обладает модель BRI (AUC 0,799). Индекс ABSI для нашей выборки не показал высокой прогностической способности ни для одного из возрастных диапазонов.
3. Предлагаемая программа представляет собой новый надежный рабочий инструмент для практической работы врача в медицине труда.

## 6. Список литературы

1. *Замятин, А. В.* Введение в интеллектуальный анализ данных : учебное пособие / А. В. Замятин ; Нац. исслед. Том. гос. ун-т. – Томск : Издательский Дом Томского государственного университета. – 2016.
2. *Расулова, Ш. Ш.* Классификация данных с использованием нейронных сетей / Ш. Ш. Расулова, К. Г. Палванов // Наука в современном мире. – 2021. – С. 105–113.
3. *Дудченко, П. В.* Метрики оценки классификаторов в задачах медицинской диагностики / П. В. Дудченко // Молодежь и современные информационные технологии : сб. тр. XVI Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – 2019. – С. 164, 165.
4. Приказ Министерства труда Российской Федерации от 16 декабря 2022 г. № 786 «О проведении оперативного мониторинга в целях обеспечения занятости населения».
5. Приказ министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 28 декабря 2021 г. № 926 «Об утверждении рекомендаций по выбору методов оценки уровней профессиональных рисков и по снижению уровней таких рисков».
6. *Liu, C.* Efficient generation of receiver operating characteristics for the evaluation of damage detection in practical structural health monitoring applications / C. Liu, J. Dobson, P. Cawley // Proc R Soc A: Math Phys Eng Sci. – 2017. – Vol. 473, №. 2199. – DOI 10.1098/rspa.2016.0736.
7. Over the ROC methodology: Productivity, economic size and firms' export thresholds / S. Costa, F. Sallusti, C. Vicarelli [et al.] // Review of International Economics. – 2019. – Vol. 27, No. 3. – P. 955–980. – DOI 10.1111/roie.12405.
8. *Мудров, В. А.* Алгоритм применения ROC-анализа в биомедицинских исследованиях с помощью пакета программ SPSS / В. А. Мудров // Забайкальский медицинский вестник. – 2021. – № 1. – С. 148–153. – DOI 10.52485/19986173\_2021\_1\_148. – EDN KKABAY.
9. Указ Президента РФ от 30.03.2022 № 166 «О мерах по обеспечению технологической независимости и безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации».
10. Росстат изучил рацион питания россиян. Федеральная служба государственной статистики. – URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/313/document/70761> (дата обращения: 20.10.2023).
11. Ведущие факторы риска формирования патологий системы кровообращения и костно-мышечной системы у работников металлургического предприятия / Е. Л. Базарова, А. Н. Вараксин, Т. А. Маслакова [и др.] // Здоровье населения и среда обитания – ЗНиСО. – 2023. – Т. 31, № 11. – С. 50–57. – DOI 10.35627/2219-5238/2023-31-11-50-57. – EDN NBCSZH.

12. Sex- and age-specific optimal anthropometric indices as screening tools for metabolic syndrome in Chinese adults / J. Zhang, W. Zhu, L. Qiu [et al.] // International Journal of Endocrinology. – 2018. – P. 1–16. – DOI 10.1155/2018/1067603.
13. *Ослопов, В. Н.* Индекс формы тела – новый индикатор риска преждевременной смерти / В. Н. Ослопов, О. В. Богоявленская // Казанский медицинский журнал. – 2015. – Т. 96, № 2. – С. 253–256. – DOI 10.17750/KMJ2015-253. – EDN TMHTHP.
14. *Kahn, H. S.* The lipid accumulation product is better than body mass index for identifying diabetes / H. S. Kahn // Am. J. Epidemiol. – 2005. – Vol. 161. – P. S51. – DOI 10.1093/aje/161.Supplement\_1.S51c.
15. Relationships between body roundness with body fat and visceral adipose tissue emerging from a new geometrical model / D. M. Thomas, C. Bredlau, A. Bosy-Westphal [et al.] // Obesity (Silver Spring). – 2013. – Vol. 21. – P. 2264–2271. – DOI 10.1002/oby.20408.
16. *Kahn, H. S.* Estimating adult metabolic risk from a lipid accumulation product / H. S. Kahn // Am J Epidemiol. – 2004. – Vol. 159.
17. The feasibility of two anthropometric indices to identify metabolic syndrome, insulin resistance and inflammatory factors in obese and overweight adults / G. Li, H. K. Wu, X. W. Wu [et al.] // Nutrition. – 2019. – Vol. 57. – P. 194–201. – DOI 10.1016/j.nut.2018.05.004.
18. Body roundness index and body adiposity index: two new anthropometric indices to identify metabolic syndrome among Chinese postmenopausal women / P. J. Liu, F. Ma, H. P. Lou [et al.] // Climacteric. – 2016. – Vol. 19. – P. 433–439. – DOI 10.1080/13697137.2016.1202229.
19. *Krakauer, N. Y.* A New Body Shape Index Predicts Mortality Hazard Independently of Body Mass Index / N. Y. Krakauer, J. C. Krakauer // PLoS One. – 2012. – Vol. 7, No. 7. – P. e39504. – DOI 10.1371/journal.pone.0039504.
20. *Корнеевков, А. А.* Вычисление и интерпретация показателей информативности диагностических медицинских технологий / А. А. Корнеевков, С. В. Рязанцев, Е. Э. Вяземская // Медицинский совет. – 2019. – № 20. – С. 45–51. – DOI 10.21518/2079-701X-2019-20-45-51. – EDN FMTNPQ.
21. *Moreira, D.* Comparing Empirical ROC Curves Using a Java Application: CERCUS / D. Moreira, A. C. Braga // Computational Science and Its Applications–ICCSA 2019: 19th International Conference, Saint Petersburg, Russia. – 2019. – P. 25–37. – DOI 10.1007/978-3-030-24302-9\_3.

### Сведения об авторах:

**Билаш Наталья Викторовна**, студентка Уральского Федерального университета им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия. Эл. почта: [natalia.vict@mail.ru](mailto:natalia.vict@mail.ru)

**Константинова Екатерина Даниловна**, к. ф.-м. н., старший научный сотрудник, и. о. заведующего лабораторией биостатистики Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия. Эл. почта: [K.Konst@ecko.uran.ru](mailto:K.Konst@ecko.uran.ru)

**Огородникова Светлана Юрьевна**, младший научный сотрудник Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия. Эл. почта: [ogor.svetalana@ecko.uran.ru](mailto:ogor.svetalana@ecko.uran.ru)

**Маслакова Татьяна Анатольевна**, к. ф.-м. н., научный сотрудник Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия. Эл. почта: [masta@ecko.uran.ru](mailto:masta@ecko.uran.ru)

## REALIZATION OF ROC ANALYSIS TO DETERMINE THRESHOLD VALUES OF NEW ANTHROPOMETRIC INDICES BRI, ABSI, LAP

N.V. Bilash<sup>1</sup>, E.D. Konstantinova<sup>2</sup>, S.Yu. Ogorodnikova<sup>2</sup>, T.A. Maslakova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,  
Ekaterinburg, Russia

<sup>2</sup> Institute of Industrial Ecology, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg,  
Russia

The article presents the results of ROC analysis and determination of threshold values of the anthropometric indices Body Roundness Index (BRI), A Body Shape Index (ABSI), Lipid Accumulation Product (LAP), which allow identifying a risk group for metabolic syndrome (MS). We used retrospective data from 347 male workers employed in hazardous working conditions at five industrial enterprises in the Sverdlovsk region. A program was developed in the high-level general-purpose programming language Python. The possibility of implementing ROC analysis, determining diagnostic threshold values of anthropometric indices, as well as visual positioning of the cut-off point on the graph has been demonstrated. The obtained values were compared with the results of using the applied statistical package SPSS 29 (SPSS, Chicago, Illinois, USA). Diagnostic thresholds for four age groups, found using the written program, were: BRI – (4.1–4.4), ABSI – (0.079–0.083), LAP – (49.7–70.5).

**Key words:** ROC analysis; Cut-off point; diagnostic threshold; anthropometric indices; metabolic syndrome; harmful working conditions.

### References

1. Zamyatin, A. V. Introduction to data mining: textbook / A. V. Zamyatin; National research. – Tomsk: Publishing House of Tomsk State University. – 2016. [In Russian].
2. Rasulova, S. S. Classification of data using neural networks / S. S. Rasulova, K. G. Palvanov // Science in the modern world. – 2021. – P. 105–113. [In Russian].
3. Dudchenko, P. V. Metrics for assessing classifiers in medical diagnostic tasks / P. V. Dudchenko // Youth and modern information technologies: collection of proceedings of the XVI International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduate Students and Young Scientists. – 2019. – P. 164–165. [In Russian].
4. Order of the Ministry of Labor of the Russian Federation N 786 dated December 16, 2022 "On conducting operational monitoring in order to ensure employment of the population". [In Russian]
5. Order of the Ministry of Labor and Social Protection of the Russian Federation No 926 dated December 28, 2021 "On approval of recommendations for the selection of methods for assessing the levels of professional risks and for reducing the levels of such risks". [In Russian].
6. Liu, C. Efficient generation of receiver operating characteristics for the evaluation of damage detection in practical structural health monitoring applications / C. Liu, J. Dobson, P. Cawley // Proc R Soc A: Math Phys Eng Sci. – 2017. – Vol, 473. – No. 2199. – DOI 10.1098/rspa.2016.0736.
7. Over the ROC methodology: Productivity, economic size and firms' export thresholds / S. Costa, F. Sallusti, C. Vicarelli [et al.] // Review of International Economics. – 2019. – Vol. 27, No. 3. – P. 955–980. – DOI 10.1111/roie.12405.
8. Mudrov, V. A. ROC curve analysis algorithm in biomedical research using SPSS software package / V. A. Mudrov // Zabaikalsky Medical Bulletin. – 2021. – N 1. – P. 148–153. – DOI 10.52485/19986173\_2021\_1\_148. – EDN KKABAY. [In Russian].

9. Decree of the President of the Russian Federation No 166 dated 30.03.2022 "On measures to ensure the Technological Independence and security of the Critical Information Infrastructure of the Russian Federation". [In Russian].
10. Rosstat studied the diet of Russians. Federal State Statistics Service. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/313/document/70761> (accessed: 20.10.2023). [In Russian].
11. *Bazarova, E.L.* Experimental data on the risk-normalization of the pathological system of bone and musculoskeletal system in workers of the metallurgical direction / E.L. Bazarova, A. N. Varaksin, T.A. Maslakova [et al.] // *Public Health and Life Environment – PH&LE.* – 2023. – Vol. 31. – No 11. – pp. 50–57. – DOI 10.35627/2219-5238/2023-31-11-50-57. – EDN NBCSZH.
12. Sex- and age-specific optimal anthropometric indices as screening tools for metabolic syndrome in Chinese adults / J. Zhang, W. Zhu, L. Qiu [et al.] // *International Journal of Endocrinology.* – 2018. – P. 1–16. – DOI 10.1155/2018/1067603.
13. *Osloпов, V. N.* Body shape index - a novel premature death risk factor / V. N. Osloпов, O. V. Bogoyavlenskaya // *Kazan Medical Journal.* – 2015. – Vol. 96. – N 2. – P. 253–256. – DOI 10.17750/KMJ2015-253. – EDN TMHTHP. [In Russian].
14. *Kahn, H. S.* The lipid accumulation product is better than body mass index for identifying diabetes // *Am. J. Epidemiol.* – 2005. – Vol. 161. – P. S51. – DOI 10.1093/aje/161.Supplement\_1.S51c.
15. Relationships between body roundness with body fat and visceral adipose tissue emerging from a new geometrical model / D. M. Thomas, C. Bredlau, A. Bosy-Westphal [et al.] // *Obesity (Silver Spring).* – 2013. – Vol. 21. – P. 2264–2271. – DOI 10.1002/oby.20408.
16. *Kahn, H. S.* Estimating adult metabolic risk from a lipid accumulation product / H. S. Kahn // *Am J Epidemiol.* – 2004. – Vol. 159.
17. The feasibility of two anthropometric indices to identify metabolic syndrome, insulin resistance and inflammatory factors in obese and overweight adults / G. Li, H. K. Wu, X. W. Wu [et al.] // *Nutrition.* – 2019. – Vol. 57. – P. 194–201. – DOI 10.1016/j.nut.2018.05.004.
18. Body roundness index and body adiposity index: two new anthropometric indices to identify metabolic syndrome among Chinese postmenopausal women / P. J. Liu, F. Ma, H. P. Lou [et al.] // *Climacteric.* – 2016. – Vol. 19. – P. 433–439. – DOI 10.1080/13697137.2016.1202229.
19. *Krakauer, N. Y.* A New Body Shape Index Predicts Mortality Hazard Independently of Body Mass Index / N. Y. Krakauer, J. C. Krakauer // *PLoS One.* – 2012. – Vol. 7, No. 7. – P. e39504. – DOI 10.1371/journal.pone.0039504.
20. *Korneenkov, A. A.* Calculation and interpretation of information content indicators of diagnostic medical technologies / A. A. Korneenkov, S. V. Ryazantsev, E. E. Vyazemskaya // *Medical Advice.* – 2019. – No 20. – P. 45–51. – DOI 10.21518/2079-701X-2019-20-45-51. – EDN FMTNPQ. [In Russian].
21. *Moreira, D.* Comparing Empirical ROC Curves Using a Java Application: CERCUS / D. Moreira, A. C. Braga // *Computational Science and Its Applications–ICCSA 2019: 19th International Conference, Saint Petersburg, Russia.* – 2019. – P. 25–37. – DOI 10.1007/978-3-030-24302-9\_3.